

Gold schürfen – Gift ernten

Bergbaubedingte Schwermetallbelastung von Böden im Südosten von Georgien

Von Peter Felix-Henningsen, Eliso Narimanidze-King, Diedrich Steffens, Sylvia Schnell, Thomas Hanauer, Stephan Jung und Hülya Kaplan



Georgien war einst der Gemüse-, Tee- und Obstgarten der Sowjetunion. Auch heute ist das kaukasische Land auf seine Landwirtschaft angewiesen. Doch die Lebensgrundlage der Bevölkerung beispielsweise im Tal des Mashavera-Flusses im Südosten Georgiens wird durch massive Umweltprobleme bedroht: Die fruchtbaren Böden der Region sind mit den Schwermetallen Cadmium, Kupfer und Zink belastet. Diese stammen aus dem Abraum und Abwasser eines Gold- und Kupfertagebaus am Oberlauf des Mashavera. Durch Haldenerosion und Abwassereinleitung belasten sie den Fluss und gelangen über das Flusswasser, das zur Bewässerung der landwirtschaftlichen Nutzflächen eingesetzt wird, auf die Böden der Äcker und Gärten des Tals und nach der Aufnahme der Metalle durch die angebauten Nutzpflanzen auch in die Nahrungskette. Des Weiteren schränken die hohen Schwermetallgehalte die Lebensraumfunktionen der Böden ein, was sich durch eine verringerte mikrobielle Aktivität bemerkbar macht. Wie hoch die tatsächliche Belastung ist und ob es Möglichkeiten gibt, die Bodenfunktionen auf den belasteten Flächen wiederherzustellen, wird in einem Forschungsprojekt untersucht, das die VolkswagenStiftung finanziert.

■ Der Mashavera-Fluss, der durch das Untersuchungsgebiet fließt, ist mit Abraum eines Kupfer- und Goldtagebaus belastet. Die äußerst fruchtbaren Böden des Mashavera-Tals werden intensiv landwirtschaftlich genutzt. Eine große Gefahr für die Nahrungskette entsteht durch die Belastung der Böden mit Schwermetallen, die bei der Bewässerung mit der Schwebfracht in die Böden gelangen.

Georgien wird im Norden, Nordosten und im Süden durch die beiden Käme des Großen und des Kleinen Kaukasus begrenzt. Im Westen bildet das Schwarze Meer die natürliche Landesgrenze. Die Fläche des Landes beträgt rund 69.700 km² – das entspricht in etwa der Größe Bayerns – und die Einwohnerzahl etwa 4,4 Millionen. Der Gebirgszug Lichi teilt das Land in Ost- und Westgeorgien. Diese unterscheiden sich durch ihr Relief, Klima, die Böden und die Landnutzung deutlich voneinander. Klimageografisch gehört Georgien zum Südrand der temperaten Zone; allerdings führt der abnehmende Höhengradient des Reliefs zwischen Ost- und Westgeorgien zu deutlichen klimatischen Unterschieden der einzelnen Landesteile: von niederschlagsreichen, warm temperaten Bedingungen im Westen bis zu trockenen und gemäßigt kontinentalen Bedingungen im Osten.

Traditionell ist Georgien ein Agrarland. Zu sowjetischen Zeiten war die Landwirtschaft großflächig organisiert und auf den Export vor allem von Tee, Wein, Obst und Zitrusfrüchten ausgerichtet. Die Landwirtschaft hat zu sowjetischen Zeiten dazu beigetragen, dass Georgien den höchsten Lebensstandard innerhalb der ehemaligen Sowjetunion erreichte.

Nach dem Zusammenbruch des sozialistischen Systems Anfang der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts war auch der Agrarsektor einem

Wandel unterworfen. Dieser führte zu einer Privatisierung der staatlichen landwirtschaftlichen Flächen und somit zu einer Reorganisation bzw. Aufspaltung der Kolchosen in kleinere private Betriebe.

Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Region Bolnisi in Südost-Georgien im Kleinen Kaukasus, etwa 80 km südlich der Hauptstadt Tiflis (Tbilisi). In dieser

Die Kooperationspartner

Auf georgischer Seite sind Prof. Tengiz Urushadze, Prof. Besik Kalandaze und Levan Navrozashvili vom Institut für Geografie der Staatlichen Ivane-Javakishvili-Universität in Tiflis an dem Forschungsprojekt beteiligt. Sie organisieren die Feldkampagnen vor Ort und betreuen Feldversuche und Probenahme. Außerdem sind sie entscheidend für den Kontakt sowohl zur Bevölkerung des Mashavera-Tals, wie auch zu Politikern und Behörden.

Region herrscht klimatisch eine ausgeprägte Kontinentalität. Die Klimastation Bolnisi verzeichnet im langjährigen Mittel einen Jahresniederschlag von 504 mm bei einer Jahresdurchschnittstemperatur von 12,4°C.

■ Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes im Einzugsgebiet des Flusses Mashavera in Georgien, etwa 80 km südlich der Hauptstadt Tiflis in Süd-Ost-Georgien.

(Quelle: Wikipedia.org; Don-kun, Bourrichon, verändert)



Im Untersuchungsgebiet sind Variationen von dunklen, tiefgründig humosen und sehr fruchtbaren Böden, als Kastanozeme und Chernozeme bezeichnet, anzutreffen. Besteht die Möglichkeit, landwirtschaftliche und gärtnerische Nutzflächen zu bewässern, so handelt es sich in dieser Klimaregion um einen agrarwirtschaftlichen

Vorzugsraum. Allerdings ist die landwirtschaftliche Nutzung im Gebirge durch die steile Hangneigung auf die Täler beschränkt. Das Hauptfließge-

wässer des Untersuchungsgebietes ist der Fluss Mashavera, dessen Quellgebiet westlich des Mashavera-Tals liegt.

Bergbau vs. Landwirtschaft

Die landwirtschaftlich genutzten, fruchtbaren Böden des Tals werden seit mehr als vier Jahrzehnten großflächig durch schwermetallhaltiges Bewässerungswasser mit Cadmium, Kupfer und Zink kontaminiert. Verursacher der anhaltenden Belastung ist der nahe der Siedlung Kazreti gelegene „Madneuli“-Tagebau. Hierbei handelt es sich um den größten Buntmetalltagebau des Landes, in dem der Abbau von kupfer- und goldhaltigen Erzen erfolgt. Auf Grund der fehlenden Abdeckung von schwermetall- und sulfidhaltigen Abraumhalden und veralteter technischer Anlagen kommt es zum unkontrollierten Eintrag von sauren Minenabwässern (auch bekannt als „acid mine drainage“) und zur Abwassereinleitung in die benachbarten Fließgewässer. Insbesondere über den Nebenfluss Kazretula gelangen auf diese Weise große Mengen an schwermetallhaltigen Schwebstoffen in den Mashavera. An der Einmündung des Kazretulas in den Mashavera werden pH-Werte von 2,8 gemessen, die mit stark erhöhten Konzentrationen von



Teilnehmer des Filmprojektes *sciencemovies* der VolkswagenStiftung

Sciencemovies

In einer Förderinitiative unter dem Titel „Wissenschaft – Öffentlichkeit – Gesellschaft“ stärkt die Volkswagen-Stiftung seit langem den Dialog zwischen Forschung und Gesellschaft. Mit dem Videoblog *sciencemovies* weist die Stiftung acht ausgewählten Förderprojekten den Weg in die Öffentlichkeit. Hierfür haben die Wissenschaftler selbst über ein halbes Jahr lang ihren jeweiligen Forschungsalltag mit der Kamera begleitet. In den Videobeiträgen geben sie einen lebendigen Einblick in ihre wissenschaftliche Arbeit. Jedes Projekt wird in zehn Folgen mit einer Länge von jeweils etwa drei Minuten vorgestellt, so auch das Projekt „Schwermetallbelastung der Böden im Mashavera-Tal“: <http://www.sciencemovies.de>

Was eigentlich sind Schwermetalle ...?

Definitionsgemäß sind Schwermetalle Metalle mit einer Dichte von $3,5\text{--}5\text{ g cm}^{-3}$. Dazu zählen zum einen die für den Stoffwechsel von Menschen, Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen essentiellen Spurenelemente, wie z.B. Eisen, Mangan und Zink, andererseits aber auch solche Metalle, die entweder keine physiologische Bedeutung besitzen oder sogar schon in geringen Konzentrationen toxisch wirken, wie z.B. Blei, Cadmium oder Quecksilber.

Auch das Halbmetall Arsen wird aufgrund seiner Dichte, der Toxizität seiner Verbindungen und teilweise ähnlicher chemischer Reaktionen häufig noch mit zu den Schwermetallen gezählt.



... wie gelangen sie in den Boden...?

Im Gegensatz zu den meisten organischen Schadstoffen kommen Schwermetalle als natürlicher Bestandteil der Minerale in Gesteinen und damit auch dem Boden vor (lithogener Ursprung); sie sind nicht abbaubar. Allerdings werden sie

durch Erzbergbau und Metallverarbeitung, aber auch durch Abfälle, Düngemittel, Staub und Abgase im Oberboden lokal und regional angereichert (anthropogener Eintrag).

... und wie kommen sie in die Nahrungsmittel?

Generell gilt, dass jede Pflanze essentielle Metalle, darunter auch Kupfer und Zink, in geringen Mengen als Spurenelemente benötigt und aufnimmt. Aber auch bei diesen führt eine Überversorgung zu einer Schädigung, wie Wachstumsdepressionen etc.. Allerdings werden auch nicht-essentielle oder gar toxische Metalle, wie beispielsweise Cadmium, von allen Pflanzen aufgenommen. Doch gibt es erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Aufnahme von Schwermetallen zwischen den verschiedenen Pflanzenarten. Ein sehr hohes Anreicherungsvermögen haben Salat, Spinat, Karotten oder Kresse, während Bohnen, Erbsen, Tomaten oder Paprika deutlich geringere Mengen an Schwermetallen aufnehmen. Des Weiteren gilt, dass Schwermetalle bevorzugt in den vegetativen Pflanzenteilen wie Blätter und Stängel eingelagert werden, während sie in generativen Pflanzenteilen, also den Früchten, in deutlich geringerem Maße angereichert werden.



■ Abb. 2a (links): Abraumhalde des Erztagebaus mit deutlichen Spuren der Erosion. Abb. 2b (oben): Das mit Schwebfracht belastete Wasser in einem Zufluss zum Mashavera ist durch die Oxidation sulfidischer Erzpartikel stark versauert und mit Schwermetallen belastet.



■ Abb. 3: In einer Fabrik der Ortschaft Kazreti werden die Erzpartikel vom Gestein durch Flotation getrennt. Die durch sukzessive Aufschüttung entstandenen Dammgenerationen eines riesigen Beckens für Flotationsrückstände, das sich oberhalb eines Wohngebietes befindet, werden nur spärlich von Vegetation bewachsen und unterliegen der Erosion. Das Erosionsmaterial wird in den Mashavera gespült.



■ Abb. 4: Der Oberflächenabfluss der Halden und die Abwässer der Flotationsanlage der Fabrik in Kazreti transportieren Schwebfracht in den Mashavera, insbesondere über dessen Nebenfluss Kazretula.

Cadmium, Kupfer und Zink im Gewässer einhergehen.

Das belastete Wasser des Mashavera wird über mehrere Kanäle in das Bewässerungssystem des Tales eingespeist und gelangt dadurch auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen, die unterhalb des Kanalsystems liegen. Daher werden die mit Mashavera-Wasser bewässerten Böden großflächig mit Schwermetallen befrachtet.

Zu Beginn unseres Forschungsprojektes bestand der Verdacht, dass auf Grund der seit Jahrzehnten bestehenden Haldenerosion und Abwassereinleitung die bewässerten Böden erheblich mit Schwermetallen belastet sind und dementsprechend auch von einer Belastung der Nahrungskette auszugehen sei.

Wie schlimm ist es wirklich ...für den Boden?

Ein Charakteristikum der Böden im Untersuchungsgebiet sind hohe Tongehalte von bis zu 62 %. Die pH-Werte der Böden liegen zumeist im sehr schwach bis schwach alkalischen

Tabelle 1: Hintergrundwerte der Schwermetalle im Untersuchungsgebiet

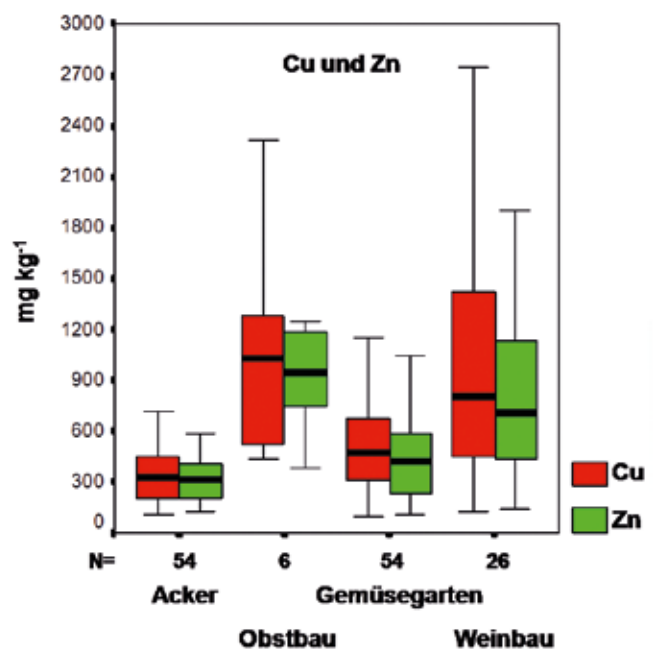
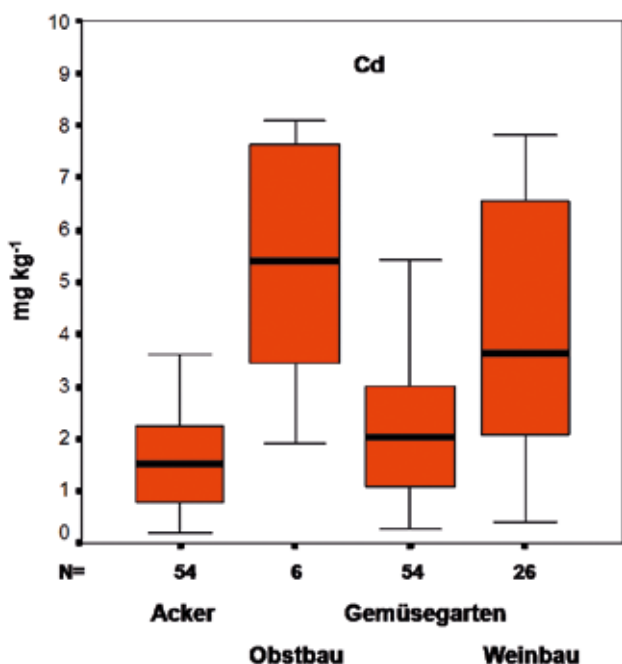
Cadmium	Kupfer	Zink
≤ 0,45 mg kg ⁻¹	≤ 89 mg kg ⁻¹	≤ 140 mg kg ⁻¹

Bereich und bieten damit ideale Voraussetzungen, Schwermetalle in einer schwer pflanzenverfügbaren Form zu binden. Einen ebenfalls positiven Einfluss auf die Immobilisierung der eingetragenen Schwermetalle haben neben den hohen pH-Werten und Tongehalten auch die relativ hohen Humus- und Carbonatgehalte der Böden.

Um eine objektive Aussage zur Schwermetallbelastung der Böden treffen zu können, wurden die Eigenschaften der landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden untersucht und deren Gehalte an Cadmium, Kupfer und Zink ermittelt. Die Schwermetallanalytik wurde sowohl an Oberflächenmischproben als auch an Horizontproben unterschiedlicher Tiefe von aufgedugenen Bodenprofilen durchgeführt. Oberflächenmischproben sind Mischproben der obersten 20 cm, die aus mehreren sta-

tistisch verteilten Proben pro Fläche bestehen. Profilproben hingegen sind Mischproben der unterschiedlichen Horizonte (Tiefenabschnitte) eines Bodenprofils. Durch die Profilproben wurden Kenntnisse über eine mögliche Tiefenverlagerung von Schwermetallen gewonnen. Neben den Gesamtgehalten, die im Königswasserextrakt bestimmt wurden, einer Lösung aus einem Teil Salpeter- und drei Teilen Salzsäure, wurden auch die in Ammoniumnitrat-Extrakt, einer verdünnten Salzlösung, gelösten Cadmium-, Kupfer- und Zink-Konzentrationen be-

■ Abb. 5a und b: Belastung (Totalgehalte) der Oberböden mit den Schwermetallen Cadmium (a), Kupfer und Zink (b) in Abhängigkeit von der Landnutzung.



stimmt. Die mit Ammoniumnitrat extrahierten Schwermetalle sind für die Beurteilung der aktuellen ökotoxikologischen Situation der Böden von vorrangigem Interesse, da es sich hierbei annäherungsweise um die potentiell pflanzenverfügbaren und mit dem Sickerwasser verlagerbaren Schwermetallanteile handelt.

Ob auf Grund der eingetragenen Schwermetalle eine schädliche Veränderung der landwirtschaftlichen Böden und damit eine Gefährdung der Nahrungskette besteht oder in Zukunft zu erwarten ist wurde an Hand der deutschen *Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV, 1999)* beurteilt. Der Rückgriff auf deutsche bzw. europäische Grenzwerte (s.u.) ist nötig, da in Georgien noch keine entsprechenden Regelwerke existieren.

Die Schwermetallgehalte der Oberböden werden im Wesentlichen durch die Nutzungsart des Standortes bestimmt. Hierbei weisen die am längs-

ten und intensivsten mit belastetem Mashavera-Wasser bewässerten Flächen auch die höchsten Cadmium-, Kupfer- und Zink-Gehalte auf. Die Belastung nimmt dabei in der Reihenfolge Acker < Hausgärten < Wein- und Obstgärten (mit Gemüse als Unterfrucht) zu. Diese Abfolge wird durch die Bewässerungsintensität bestimmt, die in gleicher Weise zunimmt. Während unbewässerte oder mit unbelastetem Wasser versorgte Böden in der Regel typische Hintergrundwerte (d. h. Schwermetallgehalte, die durch den natürlichen Mineralbestand des Bodens bedingt sind) der Region für Schwermetalle aufweisen (Tabelle 1), kommt es auf den mit Mashavera-Wasser bewässerten Flächen zu einer erheblichen Überschreitung der Hintergrundwerte – in einigen Fällen sogar um das bis zu 30fache!

Auf Grund der Bodeneigenschaften (Tongehalt, Humusgehalt, Carbonate etc.) liegen trotz hoher Gesamtgehalte

nur geringe Anteile von Schwermetallen in der mobilen, mit Ammoniumnitrat extrahierbaren Fraktion vor. Im Falle von Cadmium sind es maximal 1,5 % und für Kupfer und Zink weniger als 1 % der Gesamtgehalte. Aber vor allem auf intensiv bewässerten Gemüse- und Weinanbaustandorten mit hohen Gesamtgehalten werden auch die geringen löslichen Cadmium-Gehalte zu einer ökotoxikologisch relevanten Größe.

Vor dem Hintergrund der *BBodSchV* zeigt sich, dass im Untersuchungsgebiet bereits in einem erheblichen Umfang schädliche Veränderungen der Böden bestehen, die Nutzungseinschränkungen und Sanierungsmaßnahmen erforderlich machen. Hiervon sind mehr als die Hälfte der Standorte mit Dauerkulturen und rund 30 % der untersuchten Hausgartenflächen betroffen. Ackerbaulich genutzte Flächen dagegen zeigen schädliche Bodenveränderungen im Sinne der

DIE AUTOREN

Peter Felix-Henningsen, Jahrgang 1949, Studium der Agrarwissenschaften an der Christian-Albrecht-Universität in Kiel, Promotion 1979; Habilitation 1988 an der Friedrich-Wilhelm-Universität in Bonn; seit 1994 Leitung des Instituts für Bodenkunde und Bodenerhaltung an der Justus-Liebig-Universität Gießen.



Eliso Narimanidze-King, Jahrgang 1960, Studium der Physik an



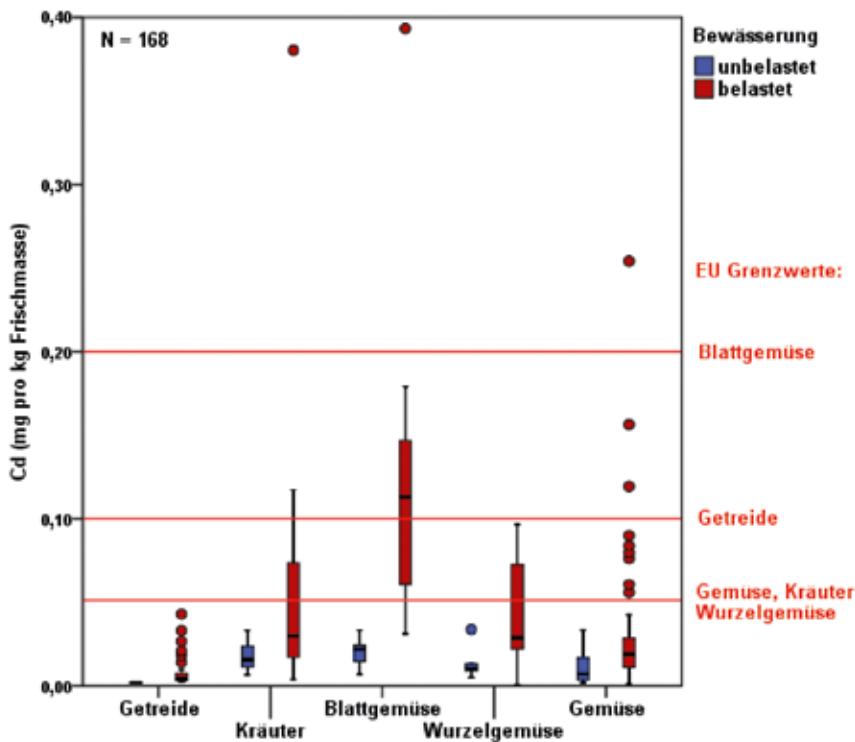
der Staatlichen Universität Tiflis; 1993 Promotion an der Lomonosov-Universität Moskau; bis 2004 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Zentrum für internationale Entwicklungs- und Umweltforschung (ZEU) der Universität Gießen; seitdem regelmäßige Mitarbeit an Projekten des ZEU.

Diedrich Steffens, Jahrgang 1954, Studium der Agrarwissenschaften an der Justus-Liebig-Universität



Gießen, Promotion 1982, seit 1988 Leiter der Gefäßversuchstation, seit 2000 apl. Professor und seit 2011 Akademischer Direktor am Institut für Pflanzenernährung.

Sylvia Schnell, Jahrgang 1963, Studium der Biologie an der Universität Konstanz; 1991 Promotion an der Eberhardt-Karl-Universität in Tübingen; 1998 Habilitation an der Philips-Universität Marburg; seit 2000 Professorin am Institut



■ Abb. 6: Cadmiumgehalte in Kulturpflanzen, die mit belastetem Wasser (Mashavera, unterhalb der Mine) und unbelastetem Wasser (Mashavera, oberhalb der Mine oder Grundwasser) bewässert wurden, in Relation zu den zulässigen Höchstgehalten der EU-Kontaminantenverordnung (2006)



für angewandte Mikrobiologie der Justus-Liebig-Universität Gießen.

Thomas Hanauer, Jahrgang 1981,

Studium der Agrarwissenschaften, Umwelt- und Ressourcenmanagement an der Justus-Liebig-Universität Gießen; seit 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung der Universität Gießen.

Stephan Jung, Jahrgang 1985, Studium der Agrarwissenschaften, Umwelt- und Ressourcenmanagement an der JLU Gießen; seit 2011

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Pflanzenernährung der Universität Gießen.

Hülya Kaplan, Jahrgang 1985, Studium der Agrarwissenschaften, Umwelt- und Ressourcenmanagement an der Justus-Liebig-Universität Gießen; seit 2011 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung.



BBodSchV nur in Einzelfällen. Eine Verlagerung in tiefere Bodenschichten war nur in einem geringen Umfang nachweisbar und kann vernachlässigt werden.

...für die Nahrungskette?

Unter humantoxikologischen Gesichtspunkten ist vor allem die Pflanzenaufnahme von Cadmium problematisch, während stark erhöhte Kupfer- und Zink-Konzentrationen eher ein Problem für die Erntequalität und den Ertrag darstellen. Daher liegt das Hauptaugenmerk dieser Studie vor allem auf der Cadmiumkonzentration in den verzehrbaren Pflanzenteilen.

Die Pflanzenproben von mit Mashavera-Wasser bewässerten Standorten weisen deutlich höhere Cadmium- und in der Regel auch höhere Kupfer- und Zink-Konzentrationen auf. Standorte mit besonders hohen Schwermetallkonzentrationen in den Pflanzenproben befinden sich in geringer Entfernung zu den Bewässerungskanälen. Auch Hausgärten sind hier betroffen.

Wir konnten eine Verlagerung von Cadmium in die Nahrungskette durch stark Cadmium anreichernde Kulturpflanzen nachweisen. Beispielsweise überschreiten 40 % der untersuchten Kohlpflanzen die zulässigen Höchstwerte nach *EU-Kontaminantenverordnung* (Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln). Dagegen werden in mäßig bis schwach Cadmium anreichernden Kulturpflanzen, wie z.B. Mais oder Tomaten, diese Gehalte nur in Einzelfällen überschritten. Eine die menschliche Gesundheit gefährdende Anreicherung von Cadmium in der Nahrungskette ist demnach insbesondere in Nahrungspflanzen zu befürchten, die in starkem Maße Schwermetalle anreichern, wie beispielsweise

Tabelle 2: Respirationsraten von Bodenmikroorganismen und mikrobielle Biomasse in belasteten und unbelasteten Böden des Mashavera-Tals (Durchschnittswerte)

	Belastete Böden (n=41)	Unbelastete Böden (n=10)
Basalrespiration ($\mu\text{g g}^{-1} \text{CO}_2 \text{ h}^{-1}$)	63,3	71,9
Substratinduzierte Respiration ($\mu\text{g g}^{-1} \text{CO}_2 \text{ h}^{-1}$)	166	216
Mikrobielle Biomasse ($\mu\text{g C g}^{-1}$)	3,75	4,87

Blattgemüse, Wurzelgemüse oder Kräuter, und auf Standorten wachsen, die mit kontaminiertem Wasser bewässert werden. Wenn es um eine konkrete Gesundheitsgefährdung der Menschen geht, so ist allerdings die Menge der konsumierten belasteten Nahrungsmittel entscheidend.

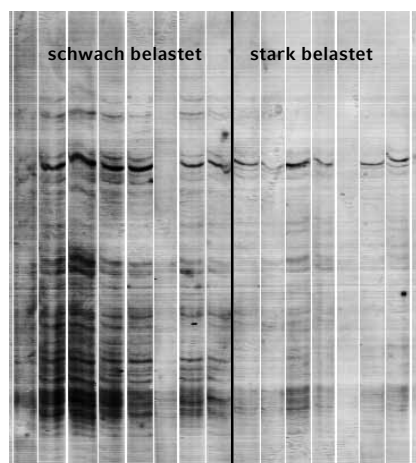
...für die Mikroorganismen?

Mikroorganismen sind in starkem Maße an vielen in Böden ablaufenden biochemischen Prozessen beteiligt und beeinflussen u. a. die Nährstoffnachlieferung, den Schadstoffabbau und die Strukturbildung der Böden.

Dass erhöhte Gehalte an Schwermetallen eine toxische Wirkung auf Bodenmikroorganismen haben ist aus zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten bekannt. Schwermetalle be-

einflussen die metabolische Aktivität und die Zusammensetzung der Mikroorganismengemeinschaft. Dabei nimmt die Toxizität der Schwermetalle gegenüber Mikroorganismen in der Reihenfolge Cadmium > Kupfer > Zink ab. Allerdings unterscheiden sich Mikroorganismen in ihrer Sensitivität gegenüber Schwermetallen, was zum Absterben oder zu einem starken Rückgang sensibler Mikroorganismen und so zu einer Verschiebung des Artenspektrums führen kann. Diese Veränderungen beeinflussen die biochemischen Prozesse im Boden, was anhand z. B. der mikrobiellen Biomasse, der Respirationsrate, bestimmter Enzymaktivitäten oder des Gehalts an organischer Substanz messbar ist.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen eine geringere mikrobielle Aktivität in Böden, die mit Mashavera-Wasser bewässert wurden. Die Basalrespiration, die bestimmt wird durch die Messung der Kohlendioxid-Bildung der Mikroorganismen in inkubierten Bodenproben, weist für die belaste-



■ Abb. 7: „Molekularer Fingerabdruck“ der Bakteriengemeinschaft in stark und schwach mit Schwermetallen belasteten Bodenproben des Mashavera-Tals.

ten Böden einen deutlich niedrigeren Wert auf. Das gleiche gilt für die substratinduzierte Respiration, die nach dem Zusatz von Glukose gemessen wird. Die mikrobielle Biomasse ist in den belasteten Böden ebenfalls geringer als in den untersuchten Kontrollböden (Tabelle 2).

Außerdem führten wir Untersuchungen der mikrobiellen Populationsstruktur durch. Hierzu verwendeten wir die molekulare fingerprint-Methode PCR-SSCP (Polymerase Chain Reaction-Single Strand Conformation Polymorphism). Dies ist ein Nachweisverfahren zur Bestimmung der strukturellen Diversität der Bodenmikroorganismen durch die Extraktion und Vervielfältigung der in der Bodenprobe enthaltenen DNA („molekularer Fingerabdruck“). Hierbei zeigten sich ebenfalls deutliche Unterschiede. Stark belastete Proben unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und Stärke der DNA-Banden deutlich von den schwächer belasteten (siehe Abb. 7). Dies ist ein Hinweis auf eine Verschiebung des Artenspektrums, bedingt durch die hohen Schwermetallkonzentrationen.

Was kann man tun?

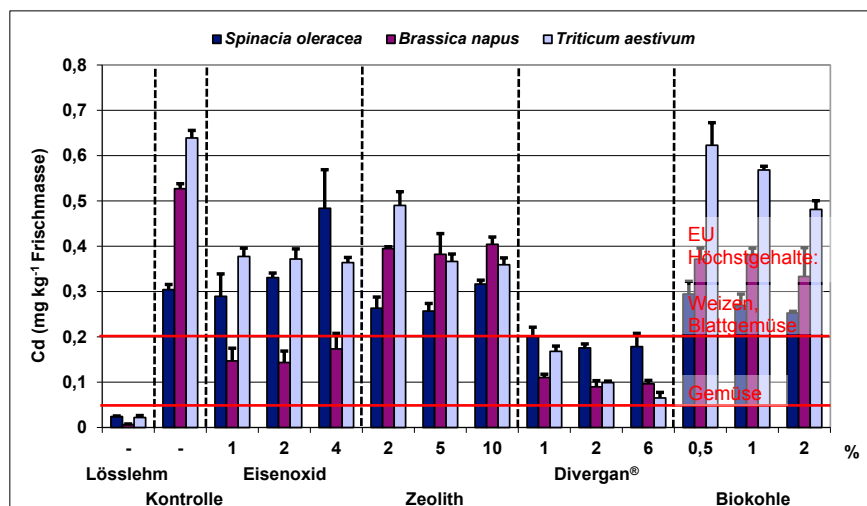
Zu allererst muss der weitere Eintrag von Schwermetallen in die Böden der



Lösslehm (Kleinlinden)	Kontrolle	4% Fe	10% Zeolith	6% Divergan®	2% Biokohle
		2% Fe	5% Zeolith	2% Divergan®	1% Biokohle
		1% Fe	2% Zeolith	1% Divergan®	0,5% Biokohle

landwirtschaftlichen Nutzflächen des Mashavera-Tals unterbunden werden. Dazu ist die Sicherung der Abraumhalden des Tagebaus durch Abdeckung mit einer durchwurzelbaren Bodenschicht und Bepflanzung notwendig. Des Weiteren muss die lokale Bevölkerung über die Gefahren des Anbaus und Verzehrs von Cadmium anreichernden Pflanzen aufgeklärt werden, unter Umständen sind auch Nutzungsverbote notwendig. Als letz-

■ Abb. 8: Einfluss verschiedener Bodenzusätze zur *in-situ*-Immobilisierung der Schwermetalle in einem belasteten Oberboden des Untersuchungsgebietes auf das Wachstum von Spinat im Gefäßversuch (Erläuterung siehe Abb. 9).



■ Abb. 9: Der Rückgang der Cadmiumkonzentrationen in Spinat (*Spinacia oleracea*), Schnittkohl (*Brassica napus*) und Weizenkorn (*Triticum aestivum*) durch die *in-situ*-Immobilisierung der Schwermetalle in einem belasteten Oberboden des Untersuchungsgebietes im Gefäßversuch. Lösslehm: Unterboden einer Parabraunerde aus Kleinlinden, Kontrolle: ohne Bodenzusatz; Fe: amorphes Eisenoxid; Zeolith: Gerüst-Silikat; Divergan®: organisches Polymer; Biokohle: hergestellt aus Erdnusschalen.

ter und mit Sicherheit aufwendigster Schritt käme noch eine Sanierung der kontaminierten Böden in Frage, damit diese auch künftigen Generationen zur Nahrungsmittelproduktion im vollen Umfang zur Verfügung stehen.

Hierzu werden seit geraumer Zeit am Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung sowie am Institut für Pflanzenernährung der Universität Gießen und im Mashavera-Tal selbst Labor-, Klimakammer- und Feldversuche zur *in-situ*-Immobilisierung von Schwermetallen durchgeführt. *In-situ*-Immobilisierung wird jedes Verfahren genannt, bei dem die Schwermetalle zwar im Boden verbleiben, aber ihre Mobilität und Bioverfügbarkeit durch Bodenzusätze eingeschränkt werden. Dies geschieht entweder durch Anhebung des Boden-pH-Wertes durch Kalkung, denn Cadmium, Kupfer und Zink sind im neutralen pH-Bereich wesentlich immobil, und/oder durch die Zugabe geeigneter Bodenzusätze, die ein hohes Bindungsvermögen für Schwermetalle aufweisen.

Da die Böden des Mashavera-Tals bereits einen nahezu neutralen pH-Wert aufweisen, bleibt nur die Zugabe von Bodenzusätzen. Aktuell werden vier verschiedene Stoffe getestet, die spezifische Sorptionsplätze (Bindungsplätze für Ionen an Bodenpartikel) für Schwermetalle besitzen und somit deren Pflanzenverfügbarkeit reduzieren sollen: Amorphes Eisenoxid, Zeolith (ein Gerüst-Silikat), Divergan® und Biokohle (Biochar), ein organisches Polymer mit großer innerer Oberfläche.

Im Gefäßversuch gelang es mit allen Bodenzusätzen, sowohl den Ertrag zu erhöhen als auch die Cadmium-Konzentrationen in den Pflanzen zu reduzieren. Die besten Ergebnisse wurden dabei mit Divergan® erzielt. Inwiefern die Schwermetallbindung durch die Bodenzusätze nachhaltig ist und dies eine Sanierungsstrategie für das großflächig belastete Mashavera-Tal sein

kann, wird durch Feldversuche im Mashavera-Tal überprüft.

Fazit

Die Ergebnisse unserer Studien zeigen, dass die Böden und Kulturpflanzen des Mashavera-Tals gravierend mit Schwermetallen belastet sind, was auch negative Auswirkungen auf die mikrobielle Lebensgemeinschaft der Böden hat. Eine weitere Erhöhung der Schwermetallgehalte der Böden dort ist in Zukunft nicht mehr zu tolerieren, und entsprechende Sicherungsmaßnahmen für den Tagebau sind unumgänglich. Ob und inwieweit die bereits stark belasteten Böden saniert werden können wird aktuell noch weiter untersucht. •

Dank

Die Autoren danken der Volkswagen-Stiftung, die das Forschungsvorhaben im Rahmen der beiden dreijährigen Projekte „Bergbaubedingte Schwermetallbelastungen von Böden und Nutzpflanzen in einem Bewässerungsgebiet südlich von Tiflis/Georgien“ und „Transfer of Heavy Metals into the Food Chain from Heavily Polluted Soils of an Irrigation District in Southern Georgia“ gefördert hat bzw. fördert.



LITERATUR

Felix-Henningsen P, Urushadze T, Narimanidze E, Wichmann L, Steffens D, Kalandadze B (2007): Heavy metal pollution of soils and food crops due to mining wastes in an irrigation district south of Tbilisi, eastern Georgia. *Annales of Agrarian Science*, Vol. 5, No. 3: 11 - 27

Felix-Henningsen P, Urushadze T, Narimanidze E, Wichmann L, Steffens D, Kalandadze B (2007): Heavy metal pollution of soils and food crops due to mining wastes in the Mashavera river

valley. *Bull. Georgian Nat. Acad. Sci.*, Vol. 175, No. 3: 97 - 106

Felix-Henningsen P, Steffens D, Urushadze T, Narimanidze E, Kalandadze B (2009): Uptake of heavy metals by food crops from highly polluted Kastanozems in an irrigation district south of Tbilisi, eastern Georgia. In: King L. und Khubua, G. (Hrsg.) (2009): *Georgia in Transition: Experiences and Perspectives* (Schriften zur Internationalen Entwicklungs- und Umweltforschung), Verlag Peter Lang, Frankfurt/Main

Hanauer T, Felix-Henningsen P, Steffens D, Kalandadze B, Navrozashvili L, Urushadze T (2011): In-situ stabilization of metals (Cu, Cd, Zn) in contaminated soils in the region of Bolnisi, Georgia. *Plant and Soil* 341: 193-208

<http://www.sciencemovies.de>

KONTAKT

Prof. Dr. Peter Felix-Henningsen

Justus-Liebig-Universität
Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung
IFZ, Heinrich-Buff-Ring 26
35392 Gießen
Telefon: 0641 99-37100
Peter.Felix-H@umwelt.uni-giessen.de

Prof. Dr. agr. Diedrich Steffens

Justus-Liebig-Universität
Institut für Pflanzenernährung
IFZ, Heinrich-Buff-Ring 26-32
35392 Gießen
Telefon: 0641 99-39165
Diedrich.Steffens@ernaehrung.uni-giessen.de

Prof. Dr. Sylvia Schnell

Justus-Liebig-Universität
Institut für Angewandte Mikrobiologie
IFZ, Heinrich-Buff-Ring 26-32
35392 Gießen
Telefon: 0641 99-37350
Sylvia.Schnell@umwelt.uni-giessen.de