

[14] Walther, W.; Teichgräber, B.; Schäfer, W.; Dähne, M., 1985 Messungen ausgewählter organischer Spurenstoffe in der Bodenzone, eine Bestandsaufnahme an einem Ackerbaugelände. Z. Deutsche Geologische Gesellschaft, 136, S. 613-625.

Zusammenfassung

In einem Ackerbaugelände auf Lößboden wurde vom 1. 7. 1983 bis zum 30. 6. 1984 eine Bestandsaufnahme der Elemente Al, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb und Zn im Niederschlags- und Sickerwasser und im oberflächlichen Abfluß sowie im Sediment und dem Boden bis 1 m Tiefe durchgeführt. In den Wassern wurden Gehalte ähnlich wie in größeren Gewässern gefunden, die Sedimente waren mit Cd, Pb und Zn gering, sonst nicht belastet. Während Abflußereignissen wurden die untersuchten Elemente weitgehend an Feststoffen gebunden ausgetragen.

Summary

A survey on Al, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb and Zn has been done in a small catchment area on loess soil which is used agriculturally only. Samples were taken from deposition, seepage, runoff water, sediments and soil to a depth of 1 m. Results from water samples are similar to those found elsewhere. Apart from a slight contamination with Cd, Pb and Zn sediments can be regarded as uncontaminated. During storm water runoff the mass of dry solids is responsible for the transport of heavy metals.

Anschrift des Verfassers

Dipl.-Ing. Burkhard Teichgräber, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Postfach 33 29, 3300 Braunschweig

Bakterielle Laugung von Schwermetallen aus Baggerschlamm – Optimierung des Verfahrens im Labormaßstab

W. CALMANO, W. AHLF · HAMBURG

Bacterial leaching of heavy metals in dredged mud – optimization of the procedure in laboratory scale

DK 556.535.6:546.4/.5

[F2, H4]

Bodenschlamm in Flüssen – Schwermetalle

Bottom deposit in rivers – Heavy metals
Vase de fond dans les rivières – Métaux lourds

1 Einleitung

Mit Hilfe mikrobiologischer Laugungsverfahren ist es möglich, nach herkömmlichen Methoden nicht mehr abbauwürdige Erze (Armerze) und metallhaltige Industrierückstände wirtschaftlich nutzbar zu machen. Zahlreiche Abfallstoffe enthalten ebenfalls Wertmetalle, die zwar in so geringen Konzentrationen vorliegen, daß konventionelle Aufbereitungsverfahren nicht mehr wirtschaftlich sind, deren Gesamtwert jedoch beträchtlich ist. Auch ökologische Gesichtspunkte verlangen eine Entgiftung schwermetallhaltiger Abfälle, damit diese umweltgerecht beseitigt werden können. Die bakterielle Laugung, d.h. die Metallgewinnung mit Hilfe von Bakterien, beruht auf der Fähigkeit bestimmter Bakterien der Gattung *Thiobacillus*, schwerlösliche Metallverbindungen über biochemische Reaktionsmechanismen in wasserlösliche Metallsulfate zu überführen. Die Möglichkeit einer Reinigung stark kontaminierter Baggerschlämme und Rückgewinnung der darin enthaltenen Schwermetalle durch Fällungs-, Sorptions-, Membran- oder Ionenaustauschverfahren war grundsätzlich zu untersuchen. In der vorliegenden Arbeit wird nur die Laugung beschrieben.

Ein Vorteil der bakteriellen Laugung gegenüber der chemischen Laugung ist, daß gerade Sulfide, die mit Säuren teilweise nur schwer laugbar sind, durch bakterielle Aktivitäten besser in Lösung gehen [1]. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß die pH-Werte durch die Säureproduktion der Bakterien nur allmählich absinken, so daß die Metalle entsprechend ihrem Löslichkeitsverhalten unterschiedlich schnell in Lösung gehen und somit eventuell selektiv aus der Laugungssuspension abgetrennt werden können [2].

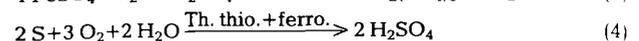
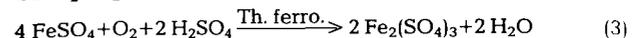
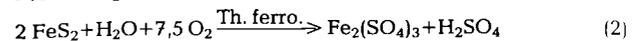
Generell lassen sich keine Aussagen über die optimalen Laugungsparameter machen, so daß für jedes zu laugende Material diese Parameter neu bestimmt werden müssen. Die Ergebnisse unserer bisherigen Untersuchungen [3, 4] zeigten, daß der Hafenschlick prinzipiell für eine mikrobielle Laugung geeignet ist. Ziel dieser Forschungen war es, hierfür die günstigsten Bedingungen zu ermitteln.

2 Bakterielle Laugung

Zur biologischen Laugung sind viele Mikroorganismen befähigt. *Thiobacillus thiooxidans* und *Thiobacillus ferrooxidans* als Hauptvertreter kommen überall vor, wo ein saures Milieu und sulfidische Mineralien anzutreffen sind. Als Energiequellen

können sie neben sulfidischen Mineralien Schwefel, Thiosulfate und Tetrathionate verwenden; *Thiobacillus ferrooxidans* verwertet zusätzlich noch Eisen (II). *Thiobacillus thiooxidans* und *Thiobacillus ferrooxidans* sind nicht alleine für die bakterielle Laugung verantwortlich, sondern noch eine Reihe anderer Mikroorganismen, die miteinander in Symbiose leben [5].

Die bakterielle Laugung beruht auf einer Wechselwirkung von biochemischen und anorganisch-chemischen Reaktionen. Generell lassen sich zwei Reaktionsmechanismen unterscheiden:



Bei der **direkten Laugung** durch *Thiobacillus ferrooxidans* werden schwerlösliche Metallsulfide (MeS) über enzymatische Oxidationsprozesse in wasserlösliche Sulfate überführt (Glg. [1] und [2]). Dabei besteht unmittelbarer Kontakt zwischen den Bakterien und dem Sulfidmineral.

Bei der **indirekten Laugung** kommt den Bakterien lediglich eine katalytische Funktion zu. Wie in Gleichung (3) beschrieben, wird zweiwertiges Eisen oxidiert. Das entstandene Eisen (III) oxidiert die Metallsulfide (Glg. [5]), und das reduzierte Eisen wird durch die Bakterien wieder oxidiert. Dieser Redoxkreislauf läuft auch ohne Bakterien ab, jedoch ist die Oxidationsgeschwindigkeit bei einem pH-Wert von 2 bis 3 unter Mitwirkung von Bakterien etwa 10^5 bis 10^6 mal größer [6].

Wie in den Gleichungen (4) und (5) beschrieben, wird der entstehende elementare Schwefel hauptsächlich von *Thiobacillus thiooxidans* zur Schwefelsäure oxidiert. *Thiobacillus ferrooxidans* kann ebenfalls Schwefel oxidieren, jedoch wesentlich langsamer, und ist somit für die Schwefelsäureproduktion von untergeordneter Bedeutung. Die Wirkung der *Thiobacillen thiooxidans* bei der bakteriellen Laugung liegt darin, daß sie einerseits durch Säureproduktion Metalle indirekt in Lösung bringen und andererseits günstige Wachstumsbedingungen für *Thiobacillus ferrooxidans* schaffen. Außerdem wird der sich an den reaktiven Oberflächen des Laugungsmaterials niederschlagende Schwefel gelöst und somit der direkte Kontakt zwischen Bakterien und Material aufrechterhalten.

Aus der obigen Darstellung ist ersichtlich, wie wichtig das Zusammenwirken der beiden Bakterienarten für die Laugung ist. Da die *Thiobacillen* aerobe autotrophe Mikroorganismen sind, ist eine gute Belüftung notwendig. Dabei ist auf möglichst kleine Blasen zu achten, die eine große Phasengrenzfläche

garantieren. Eine schnelle Nachlieferung aus der Gasphase ist für die Mikroorganismen besonders wichtig, da mit sinkendem pH-Wert die Löslichkeit von notwendigem Sauerstoff und Kohlendioxid stark abnimmt [1].

Die Aktivitäten der Bakterien sind temperaturabhängig, das Optimum liegt zwischen 28°C und 35°C. Es ist in der Regel notwendig, die Laugungssuspensionen auf einen bestimmten Anfangs-pH-Wert anzulagern, um das Wachstum der Bakterien zu starten. Der pH-Wert sollte auch nicht unter 2 absinken, da sonst die Aktivitäten der *Thiobacillen ferrooxidans* stark gehemmt werden [2].

Durch die Entwicklung des Suspensionsleachings werden viele neue Anwendungsbereiche erschlossen. Beim Suspensionsleaching wird feinkörniges Material in der Laugungsflüssigkeit suspendiert und ständig in Bewegung gehalten. Dies hat den Vorteil, daß das Verhältnis von Materialoberfläche/Materialvolumen vergrößert ist, der Kontakt mit der Laugungsflüssigkeit verbessert wird und somit den Bakterien eine größere Reaktionsfläche zur Verfügung steht. Die Durchlüftung und Steuerung der Laugungsparameter wird so erleichtert. Im Vergleich zum Perkolatorleaching werden beim Suspensionsleaching wesentlich kürzere Laugungszeiten und bessere Metallausbeuten erzielt.

3 Laugung von Hafenschlick

Schlack aus dem Hamburger Hafen enthält z. T. hohe Schwermetallkonzentrationen. Die Metalle sind unterschiedlich fest an karbonatische, hydroxidische, oxidische, organische, silikatische und sulfidische Komponenten gebunden. Für die Versuche wurden Hafenschlickproben mit unterschiedlichen Schwermetallgehalten und Korngrößen verwendet. Die für die Laugung benötigten Bakterien *Thiobacillus thiooxidans* und *ferrooxidans* sind im Schlack enthalten. Auf eine Zugabe von Laborkulturen konnte daher verzichtet werden [3]. Um für die Versuche ausreichende Zellzahlen zu erhalten, können die Bakterien durch Ansäuern des Schlacks aktiviert werden.

Hafenschlicksuspensionen (Feststoffgehalt = 2%) wurden mit verdünnter Schwefelsäure auf einen pH-Wert von 4 angesäuert und im Trockenschrank, im Dunkeln bei 30°C und unter täglichem Umschütteln aufbewahrt. Nach ca. 14 Tagen hatten die Suspensionen einen pH-Wert von 2,8. Die Bakterien vermehrten sich zwar, eine Quantifizierung durch Auszählen der Zellen war aber nicht möglich, da die meisten Bakterien an den Feststoffoberflächen haften. Bei steigender Aktivität und Vermehrung der Bakterien sank der pH-Wert der Suspension, so daß die Wachstumsrate anhand der pH-Wert-Entwicklung bestimmt werden konnte.

Die Untersuchungen verliefen in Anlehnung an das Verfahren des Suspensionsleachings. Die Versuche wurden sowohl in Erlenmeyerkolben durchgeführt als auch in einem eigens dafür konstruierten Bioreaktor. Der Bioreaktor bestand aus einem Glas-Reaktionsgefäß, das ungefähr 8 Liter faßte und mit einem Ablauf an der Seite versehen war. Der Ablauf war mit einem Sedimentationsgefäß verbunden, das im unteren Teil konisch geformt war. Darüber konnte die Suspension ablaufen und mittels einer Pumpe mit Luft nach dem Air-lift-Prinzip in den Bioreaktor zurückgepumpt werden. Der Hafenschlick wurde mit einem Magnetrührer im Bioreaktor ständig in Suspension gehalten. Redoxverhältnisse und pH-Wert wurden über Elektroden kontrolliert und aufgezeichnet. Die Versuche wurden in einem klimatisierten Raum bei 20°C durchgeführt.

Die ersten Versuche dienten der Optimierung des Anfangs-pH-Wertes und der Feststoffkonzentration. Es wurden drei Vorversuche mit Anfangs-pH-Werten von 3, 4 bzw. 5 und jeweils Feststoffkonzentrationen von 1%, 2% bzw. 5% bezogen auf das Trockengewicht angesetzt. Um zu ermitteln, ob Schwefelverbindungen als Energiequelle für die Bakterien in ausreichender Menge im Hafenschlick vorhanden sind, wurden diese in einigen Versuchsreihen zugesetzt. Außerdem wurde untersucht, inwieweit durch Animpfen mit Bakterien aus vorangegangenen Laugungsversuchen die Effektivität verbessert werden kann.

Ein Vergleich der Versuchsansätze zeigte keine Unterschiede zwischen angeimpften und nicht angeimpften Proben. Generell stiegen die pH-Werte bei den Proben mit Schwefelzusatz zuerst an. Die End-pH-Werte lagen jedoch wesentlich niedriger als bei den Ansätzen ohne Schwefelzusatz. Bedingt durch den anfänglichen pH-Wert-Anstieg dauerte die Laugung mit Schwefelzusätzen wesentlich länger (ca. 45 Tage) als bei den Versuchen ohne Schwefelzusätze (ca. 20 Tage). Bei einem Zusatz von Natriumthiosulfat lagen die End-pH-Werte in den 2%igen Suspensionen bei ca. 2,0, in den 5%igen jedoch nur bei 2,4.

Ein Vergleich der Versuche mit Natriumthiosulfat- und Schwefel-Zusatz zeigte, daß bei Zugabe von Schwefel der anfänglich gestiegene pH-Wert schneller absank und die End-pH-Werte wesentlich niedriger lagen. Besonders auffällig war, daß die niedrigsten End-pH-Werte bei einem Feststoffgehalt von 5% lagen. In einer weiteren Versuchsreihe wurde Eisensulfat zu den Proben gegeben, um die Aktivität der *Thiobacillen ferrooxidans* zu fördern. Durch die Zugabe von Eisensulfat bzw. Eisensulfat plus Schwefel wurden schon nach ca. 10 Tagen pH-Werte von ca. 2,5 erzielt; der End-pH-Wert von 1,5 war nach etwa 27 Tagen erreicht. Bei der Zugabe von Eisensulfat lagerte sich eine dicke Eisenoxid-Schicht an den Gefäßwänden ab. Dies ließ sich bei der zusätzlichen Zugabe von Schwefel nicht feststellen.

Die Ergebnisse der Metallausbeute durch die bakterielle Laugung unter verschiedenen Bedingungen sind in der Tabelle wiedergegeben.

Laugungsbedingungen und Metallausbeuten für Hamburger Hafenschlick

Bedingung	Cu	Zn	Cd	Fe	Pb	pH-Wert
	[%]					
2% FG, S, a	63	87	100	44	14	1,6
2% FG, S, na	58	87	100	42	15	1,7
2% FG, T, a	69	85	84	28	15	2,0
2% FG, T, na	70	79	83	24	12	2,0
2% FG, a	56	81	79	0,9	8	2,7
2% FG, na	56	79	86	1,1	6	2,8
5% FG, S, a	42	49	64	24	2	1,5
5% FG, S, na	44	48	54	26	3	1,5
5% FG, T, a	36	46	47	4	0,2	2,4
5% FG, T, na	35	46	47	4	1	2,4
5% FG, a	21	38	38	0,1	1	3,0
5% FG, na	17	31	29	0,1	1	3,0
2% FG, a	25	80	74	0,2	0	3,6
2% FG, FeSO ₄ , a	71	81	85	-	0	2,3
2% FG, FeSO ₄ , S, a	81	87	100	-	0	1,5
Bioreaktor: 5% FG, S, a	58	54	56	49	0,6	2,4

FG = Feststoffgehalt
S = Schwefel-Zugabe
T = Natriumthiosulfat-Zugabe
a = angeimpft
na = nicht angeimpft
- = nicht bestimmt

4 Diskussion

Generell ist festzustellen, daß bei den Versuchen mit 2% Feststoffgehalt proportional mehr Schwermetalle in Lösung gehen als bei den Versuchen mit 5% Feststoffgehalt. Cadmium wird bis zu 100% gelöst, Zink bis zu 87%, Kupfer bis zu 81%, Eisen bis zu 44% und Blei bis zu 15%. Die höchsten Metallausbeuten erhält man bei Zugabe von Schwefel, mit Ausnahme von Kupfer, welches besser bei einer Zugabe von Schwefel plus Eisensulfat gelagert wird. Bei den anderen Metallen wird durch zusätzliche Zugabe von Eisensulfat kein besseres Lösungsverhalten beobachtet, Blei wird nicht mehr gelöst.

Vergleicht man die Ansätze, bei denen Schwefel zugesetzt wurde, mit denen unter Zusatz von Thiosulfat, stellt man in der Regel eine bessere Auslaugbarkeit der Metalle bei einem Zusatz von Schwefel fest. Auffallend ist, daß zwischen den angeimpften und nicht angeimpften Ansätzen meist kein Unterschied in der Metallausbeute beobachtet werden kann. Lediglich bei einer Hafenschlicksuspension mit 5% Feststoffgehalt ohne Zusätze wird die Laugung durch Animpfung effektiver.

Die Ergebnisse zeigen, daß ein Zusammenhang zwischen pH-Wert und der Menge an gelösten Metallen nicht immer gegeben ist. So wird z. B. in den Ansätzen mit 5 % Feststoffgehalt und Schwefel-Zusatz ein sehr niedriger End-pH-Wert erreicht, wobei jedoch der Anteil an gelaugten Schwermetallen nicht entsprechend hoch ist. Bei einem Zusatz von Eisensulfat liegt der pH-Wert höher als bei vergleichbaren Ansätzen, und trotzdem werden hier mehr Schwermetalle gelöst.

Die Ergebnisse des Versuches im **Bioreaktor** zeigen, daß hier die Metalle besser gelöst werden, besonders Eisen im Vergleich zu den Versuchen mit 5 % Feststoffgehalt in Erlenmeyerkolben. Gute Ergebnisse wurden mit Anfangs-pH-Werten von 3 bzw. 4 erzielt. Bei pH 4 ist der Säureverbrauch jedoch geringer, was für eine praxisorientierte Anlage wesentlich kostengünstiger wäre.

Bei der Optimierung des Feststoffgehaltes zeigen die Versuche mit 1 % und 2 % fast gleiche und bessere Ergebnisse als die Versuche mit 5 % Feststoffgehalt. 5 % Feststoffgehalt sind allerdings aus wirtschaftlicher Sicht günstiger.

Ein Vergleich der pH-Wert-Entwicklung zeigt, daß der pH-Wert bei Zugabe von Schwefel schneller abfällt als bei Thiosulfat und auch einen tieferen Endwert erreicht. Die besten Ergebnisse wurden mit Zugabe von Eisensulfat plus Schwefel erzielt. Auffällig war hier die anfänglich sehr schnelle pH-Wert-Ermüdigung, die bei Säuredosierung weiter beschleunigt würde. Auch hier wird der End-pH-Wert nach ca. 20 Tagen erreicht.

Es wurde festgestellt, daß bei Zugabe von Eisensulfat und Schwefel kein Blei mehr in Lösung gefunden werden konnte. Auf der anderen Seite förderte gerade diese Zugabe die Laugung von Kupfer, da Kupfersulfide besser durch direkte Oxidation von *Thiobacillus ferrooxidans* gelöst werden als durch eine hohe Saurekonzentration. Diese Beobachtungen machten auch Schonborn & Hartmann [7]. Sie stellten fest, daß Kupfer erst nach zusätzlichem Animpfen mit *Thiobacillus ferrooxidans* verstärkt in Lösung ging. Das Ergebnis bestätigt außerdem die Aussage anderer Autoren, daß *Thiobacillus ferrooxidans* für die direkte Oxidation verantwortlich ist und nicht *Thiobacillus thiooxidans*.

Der optimale Feststoffgehalt ist von verschiedenen Faktoren abhängig. So kommt es auch darauf an, in welchen chemischen Bindungsformen die Metalle vorliegen, und ob bestimmte Metallkonzentrationen für die Bakterien toxisch sein können. Außerdem ist die Durchmischung sowie die Belüftung und die Korngröße des Substrates von entscheidender Bedeutung.

Die Schwierigkeiten einer großtechnischen Anwendung liegen in den großen Schlickmengen, die jährlich im Hamburger Hafen anfallen (2 Mill. m³). Da man zur Laugung nur Suspensionen mit einem Feststoffgehalt von maximal 5 % in Abhängigkeit von der Substratbeschaffenheit einsetzen kann, und die Laugungsdauer ca. 20 Tage beträgt, wären aufwendige Anlagen zur Reinigung des Schlicks notwendig. Es wäre daher illusorisch, das gesamte Baggergut aus dem Hamburger Hafen

bakteriell laugen zu wollen. Eine effektive Anwendung ließe sich allerdings bei besonders hochkontaminierten Schlickanteilen vorstellen, wie sie in bestimmten Hafenbereichen vorliegen. Dabei ist offen, inwieweit durch eine sequentielle Anordnung der Laugungsbehälter das Verfahren noch verbessert werden kann.

Schrifttum

- [1] Schäfer, W.: Probleme der Metallgewinnung aus Industrierückständen. Geomikrobiologie und Rohstoffsicherung, Expertengespräch 24./25. Nov. 1980, KFA Jülich, S. 175-185.
- [2] Bockner, K.: Mikrobielle Laugung. In: Präve, P., u. a. (Hrsg.) Handbuch der Biotechnologie. Akad. Verlagsgesellschaft, Wiesbaden, 1982.
- [3] Calmano, W.; Ahlf, W.; Förstner, U.: Heavy metal removal from contaminated sludges with dissolved sulfur dioxide in combination with bacterial leaching. Proc. Int. Conf. Heavy Metals in the Environment, Heidelberg, 1983, CEP Consultants Edinburgh, pp. 952-955.
- [4] Calmano, W.: Verfahren zur Entfernung von Schwermetallen aus Baggergut - Stand der Untersuchungen, offene Fragen, Probleme der Umsetzung. Veröff. d. Fachseminars Baggergut der Freien und Hansestadt Hamburg, 27. 2.-1. 3. 1984, S. 271-286.
- [5] Torma, A. E.; Bockner, K.: Bacterial leaching. Progress in Industrial Microbiology 16: 77-118.
- [6] Briery, C. L.: Bakterien als Helfer im Bergbau. Spektrum der Wissenschaft, Okt. 1982, S. 44-54.
- [7] Schönborn, W.; Hartmann, H.: Entfernung von Schwermetallen aus Klärschlämmen durch bakterielle Laugung. GWF-Wasser/Abwasser 120 (7): 329-335.

Zusammenfassung

Schwermetalle in kontaminierten Baggergutslämmen lassen sich durch Säure teilweise entfernen. Ein besonders wirtschaftliches Verfahren ist die Produktion der Säure und die Auslaugung der Metalle mit Hilfe von Thiobakterien. Erste Untersuchungen an Hamburger Hafenschlick haben gezeigt, daß eine bakterielle Laugung prinzipiell möglich ist. In der vorliegenden Arbeit wurden die Verfahrensbedingungen für die Suspensionslaugung optimiert. Dabei wurde sowohl der Einfluß der Feststoffkonzentration und des Anfangs-pH-Wertes als auch die Zugabe von Schwefel- und Eisenverbindungen untersucht. Gute Ergebnisse wurden mit Anfangs-pH-Werten zwischen 3 und 4 erzielt. Die Zugabe von Eisensulfat plus Schwefel wirkte sich günstig auf den pH-Wert-Verlauf aus. Das Verfahren ist nicht für große Schlickmengen geeignet; eine effektive Anwendung ließe sich allerdings bei besonders hochkontaminierten Teilmengen vorstellen.

Summary

Heavy metals can be partly leached from contaminated dredged sludges by acid. An economic procedure is the production of acid and leaching of metals by thiobacteria. First experiments with dredged mud from the Hamburg Harbour have shown that in principle bacterial leaching is possible. In the current study the conditions for suspension leaching were optimized. The influence of solid concentration and pH value as well as the addition of sulphur and iron compounds were examined. Good results were achieved with initial pH values between 3 and 4. Addition of iron sulphate and sulphur influenced pH development positively. The procedure is not applicable for large amounts of sludge but an effective treatment may be possible for small amounts of highly contaminated dredged sludge.

Anschrift der Verfasser

Dr. Wolfgang Calmano und Dr. Wolfgang Ahlf, Arbeitsbereich Umweltschutztechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, Eißendorferstr. 40, 2100 Hamburg 90

Bleibelastung von Boden und Grundwasser durch Wurftaubenschießanlagen

R. HAHN · KARLSRUHE

Lead pollution of soil and groundwater at clay pigeon shooting ranges

DK 614 771 546 813

Verunreinigungen des Bodens - Blei

Pollutants of the soil - Lead

Polluants du sol - Plomb

1 Einleitung und Problemstellung

Blei ist zwar ein natürlicher Bestandteil unseres Lebensraumes, d. h. man findet Blei sowohl im Wasser als auch in der Luft und

[1] im Boden. Anthropogene Einflüsse führen aber zu erheblichen quantitativen Veränderungen.

Für anthropogen unbelastete Böden wurden Bleigehalte von 0,1 bis 20 mg/kg ermittelt [1], wobei für eine landwirtschaftliche Nutzung ein Bleigehalt von 100 mg/kg als noch tolerierbar angesehen wird [2]. Beispielhafte Untersuchungen landwirtschaftlich genutzter Böden in Westfalen-Lippe ergaben für Ackerland 14,8 bis 68 mg/kg Blei und für Dauergrünland 11,5 bis 79,3 mg/kg [1]. In Baden-Württemberg wurden mittlere