

EINSATZ VON TONEN ZUR ABWASSERREINIGUNG

Application of Clay for Wastewater Treatment

C.-M. LEE

Institut für Siedlungswasserwirtschaft
der Universität Karlsruhe
Kaiserstr. 12, 7500 Karlsruhe

KURZFASSUNG

Aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften spielen die Tone eine zunehmend große Rolle in der Abwassertechnik. Um den ständig wachsenden Abwasserproblemen in den Entwicklungsländern zu begegnen, wird ein physiko-chemisches Verfahren unter Verwendung der Tone in Kombination mit lokal vorkommenden Chemikalien für die Abwasserreinigung untersucht. Bei der Reinigung gewerblicher und industrieller Abwässer wurde eine gute Elimination von CSB, Trübung und Gesamtphosphat erzielt und eine gute Schlammeigenschaft aufgezeigt. Die Adsorption der Abwasserinhaltsstoffe an Tone ist vom eingestellten pH-Wert der Lösung abhängig.

ABSTRACT

The clays play an important role in waste technology due to their particular properties. To control increasing problem of waste water in the developing countries a physical-chemical process for the treatment of the industrial waste water by using clay minerals in combination of the local available chemicals has been investigated.

Ionit dann in einzelnen Schichten abblättert und seine spezifische Oberfläche stark vergrößert. An die Oberflächen der Silikatschichten wird durch Van der Waal'sche Kräfte eine Adsorption von Abwasserinhaltsstoffen ermöglicht.

Aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche und deren charakteristischen Eigenschaften kommen Tonminerale häufig als wichtige Adsorbens im Rahmen der Abwasserreinigung in Frage. Ihre Eigenschaften können für bestimmte Verwendungszwecke durch geeignete Verfahren verbessert werden.

Bekanntlich nimmt die Adsorptionsfähigkeit mit zunehmender spezifischer Oberfläche der Tonminerale erheblich zu. Ihre spezifische Oberfläche vergrößert sich durch zunehmende Aufweitung der Zwischenschichten, weil dadurch die Silikatoberflächen der Zwischenschichten zugänglich werden. Neben der großen spezifischen Oberfläche ist die Ladungsverteilung an der gesamten Oberfläche der Silikatschicht für die Adsorptionsvorgänge von entscheidender Bedeutung.

3. VERSUCH

3.1 Eingesetzte Tonminerale

Die bei den Versuchen eingesetzten Tonminerale sind die handelsüblichen Bentonite und der Kaolinton, die aus verschiedenen Ländern stammen. Leider erhielten wir keine Informationen über ihre mineralische und chemische Zusammensetzung, über die Art ihrer Behandlung und Aktivierung, über ihr Ionenaustauschvermögen und ihre spezifische Oberfläche.

Ihre Ionenaustauschkapazität wurde durch die Aufnahme von NH_4 aus NH_4 -acetat-Lösung bei einstündiger Kontaktzeit und pH-Wert 7,2 ermittelt (Abb.1). Die hier gezeigten Werte sind durch Zugabe von ungequollenen Bentoniten entstanden, wobei sich mit aufgequollenen Dispersionen höherer Werte ergaben. Die

Kationenaustauschkapazität von 53 mval/100g beim Kenya-Bentonit bedeutet, daß man z.B. für die Adsorption von 1 mg Zink 62 mg Bentonit benötigt.

Aufgrund unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren weisen Tonminerale unterschiedlichen Einfluß auf den pH-Wert auf.

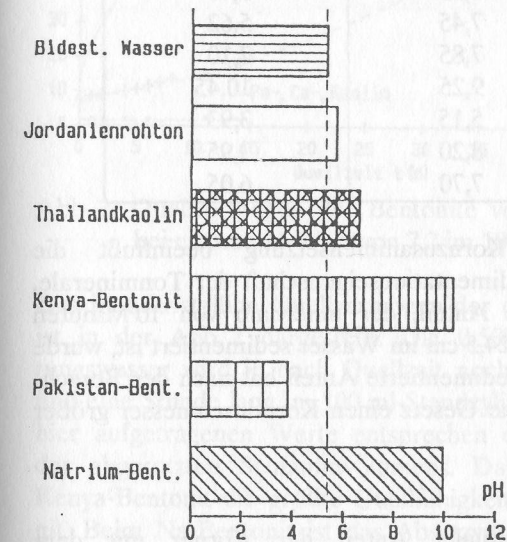


Abb. 1: Kationenaustauschkapazität der Bentonite bei $t=1h$ und $pH=7,2$

Mit einer 0,5%-igen Dispersion im Abwasser mit einem pH-Wert von 7,25 und 5%-igen Dispersion in destilliertem Wasser ist dieser Einfluß untersucht und in Tabelle 1 wiedergegeben.

Destilliertes Wasser hat den pH-Wert 5,4. Außer Pakistan-Bentonit weisen alle Tone mehr oder weniger alkalische Eigenschaften auf.

In the experimental treatment of some industrial waste water a good eliminations of COD, turbidness and total phosphorous, as well good sludge properties have been achieved. It can be concluded from this study that the adsorption of the contaminants on the clay depends on the adjusted pH-value of the solution.

1. EINLEITUNG

Die Qualität des Oberflächenwassers ist durch die ständig steigende Bevölkerungsdichte und die rasche Industrieansiedlung der großen Städte in Entwicklungsländern sehr kritisch geworden. Diese ist vor allem durch die zunehmende Nutzung der Fließgewässer für den Abtransport ungenügend behandelter Gewerbeabwässer stark bedroht.

Um die wasserwirtschaftliche Nutzung der Oberflächengewässer zu gewährleisten, sollen die Schadstoffe aus den gewerblichen und industriellen Abwässern von der Einleitung in den Vorfluter weitgehend entfernt werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes vom Bundesministerium für Forschung und Technologie wird die Anwendungsmöglichkeit des Tonminerals zur Reduzierung der Abwasserinhaltsstoffe untersucht. Zunächst werden die Eigenschaften der Tonminerale im Hinblick auf die Abwasserreinigung aufgezeigt und dann anhand einiger Untersuchungen beim Toneinsatz die erzielten Ergebnisse dargelegt.

2. TONMINERAL

Die durch die Verwitterung der magmatischen Gesteine entstandenen Tonminerale kommen in fast allen Böden in mehr oder weniger großen Mengen vor. Die weitergehende wissenschaftliche Erforschung der Tonminerale ermöglicht eine breite Verwendung dieser Bodenschätze. Insbesondere die quellfähigen Dreischichtminerale, insbesondere Montmorillonite, werden neuerdings zuneh-

mend in der adsorptiven Behandlung des Wassers eingesetzt und besitzen eine wirtschaftliche Bedeutung.

Bei der Adsorptionsleistung des Bentonites spielen neben den physikalischen Vorgängen auch Ionenaustausch-, Fällungs- und Flockungsreaktionen sowie Chemisorption eine Rolle.

2.1 Ionenaustauschfähigkeit

Eine Voraussetzung zum Verständnis der Eigenschaften der Tonminerale ist die Kenntnis ihres Gitteraufbaus. Bei dem Zweischichtmineral Kaolinit ist die Zahl der positiven und negativen Ladungen in jeder Silikatschicht gleich, sodaß keine Zwischenschichtkationen zum Ladungsausgleich notwendig sind, wobei die Zentralkationen der Dreischichtminerale schon bei der Bildung der Tonminerale zum Teil Atome anderer Wertigkeit einlagern (SCHACHTSCHABEL et al., 1984). Dadurch entstandene negative Ladung wird durch die Zwischenschichtkationen kompensiert. Die Zwischenschichtkationen sind in wäßriger Phase austauschbar. Diese Eigenschaft bezeichnet man als die Ionenaustauschfähigkeit der Tonminerale. Wie zahlreiche Untersuchungen gezeigt haben, besitzen die Tonminerale neben der Kationen- auch eine Anionenaustauschfähigkeit (HOFMAN & BILKE, 1936; WEISS et al., 1956).

2.2 Innerkristalline Quellung und spezifische Oberfläche

Zwischen die Silikatschichten mancher Dreischichtminerale kann leicht Wasser eindringen und sie auseinanderdrängen. Dieses Phänomen bezeichnet man als innerkristalline Quellung nach Hofmann, die durch die Art der austauschbaren Zwischenschichtkationen beeinflusst wird. Diese innerkristalline Quellung, insbesondere beim Na-Montmorillonit, kann sogar den Zusammenhalt des Kristallgitters auseinanderbringen, so daß der Na-Montmoril-

Tab. 1: Einfluß auf die Änderung des pH-Wertes der Lösung durch die Zugabe der Bentonite

Bentonit	pH-Wert	
	0,5%-ige Dispers.	5,0%-ige Dispers.
Wasser	7,25	5,40
Jordanienton	7,45	5,62
Thaikaolinton	7,85	7,10
Kenya-Bentonit	9,25	10,45
Pakistan-Bent.	5,15	3,93
Natrium-Bent.	8,20	9,95
Calcium-Bent.	7,70	6,05

Die unterschiedliche Kornzusammensetzung beeinflusst die Adsorptions- und die Sedimentationseigenschaft der Tonminerale. Der gewichtsprozentuale Anteil, der innerhalb von 10 Minuten durch eine Fallhöhe von 24,5 cm im Wasser sedimentiert ist, wurde bestimmt (Tab. 2). Der sedimentierte Anteil hat nach der Berechnung durch das Hook'sche Gesetz einen Korndurchmesser größer als 0,022 mm.

Tab. 2: Gewichtsprozentualer Anteil der Körner mit dem Durchmesser größer als 0,022 mm

Ton/Bentonit	Gew.-%
Rohkaolin (feingemahlen)	56,67
Thailand-Kaolinton	18,78
Pakistan-Bentonit	50,42
Kenya-Bentonit	10,92
Natrium-Bentonit	31,52
Calcium-Bentonit	58,82

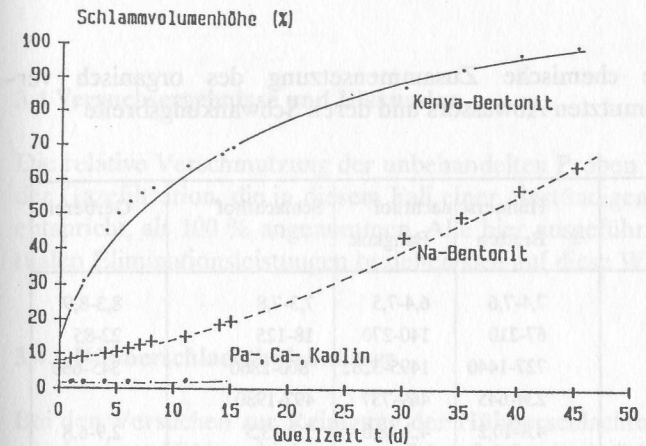


Abb. 2: Quellvermögen der Bentonite von 5 g in Leitungswasser bei einem pH-Wert von 7,2 im 100 ml-Standzylinder

Das innerkristalline Quellvermögen der eingesetzten Tonminerale ist in der Abb. 2 dargestellt. Die 0,5%-ige Dispersion in Leitungswasser wird je nach Quellzeit noch einmal gut durchmischt und eine Stunde lang im 100 ml-Standzylinder absetzen lassen. Die hier aufgetragenen Werte entsprechen dem prozentualen Anteil des abgesetzten Schlammvolumens. Dabei ergibt sich für den Kenya-Bentonit die größte Quellfähigkeit, gefolgt vom Na-Bentonit. Beim Na-Bentonit ist das Absetzverhalten hervorragend und der Überstand gegenüber dem Kenya-Bentonit wesentlich klarer.

3.2 Versuchsabwässer

Die überwiegend organisch verschmutzten Abwässer stammten aus Hühnerschlachthöfen in Gölzhausen und Bangkok/Thailand, dem Karlsruher Schlachthof und der Gerberei in Backnang. Die chemische Zusammensetzung der gazefiltrierten^{*)} und glasfaserfiltrierten Abwässer zeigt Tabelle 3.

Die anorganisch belasteten Abwässer stammten aus der Oberflächenveredelung in Pforzheim und Bangkok.

^{*)} Die Gazefiltration wird als Äquivalent für eine Vorabsetzphase genommen

Tab. 3: Die chemische Zusammensetzung des organisch verschmutzten Abwassers und deren Schwankungsbreite

Abwassertyp	Hühnerschlachthof		Schlachthof	Gerberei
	Bretten	Bangkok		
pH	7,4-7,6	6,4-7,5	7,3-7,8	8,3-8,9
Trüb. (NTU)	67-210	140-270	18-125	22-85
CSB (mg/l)	727-1440	1495-3262	800-2860	345-660
CSB _{filtr}	234-645	469-737	497-1980	-
P _{Ges.} (mg/l)	4,8-10,2	4,3-18,0	7,3-13,5	2,9-6,8
P _{Ges.filtr.}	3,3-5,7	-	9,66	-

3.3 Versuchsdurchführung und angewandte Analytik

Alle Laborversuche wurden unter dem Einsatz eines Reihenrührgerätes durchgeführt, wobei die halbtechnischen Versuche in einer kontinuierlich beschickten Anlage vorgenommen wurden. Die Trübung wurde mit Turbidimeter 2100 A von Hach ermittelt. Zur Bestimmung des CBS wurde der Auto Analyzer II von Technicon und Mikroprozessor-Universal-Photometer MPM 1500 von WTW eingesetzt. Die Gesamtphosphatbestimmung erfolgte nach dem Aufschluß mit Elko II von Zeiss. Die Schwermetallmessung wurde mit dem AAS von Perkin-Elmer durchgeführt. Alle weiteren Bestimmungen wurden nach den deutschen Einheitsverfahren durchgeführt.

3.4 Versuchsergebnisse und Diskussion

Die relative Verschmutzung der unbehandelten Proben wurde nach der Gazefiltration, die in diesem Fall einer einstündigen Absetzzeit entspricht, als 100 % angenommen. Alle hier ausgeführten prozentualen Eliminationsleistungen beziehen sich auf diese Werte.

3.4.1 Hühnerschlachthofabwässer

Bei den Versuchen zur Reinigung der Hühnerschlachthofabwässer wurde eine pH-Verschiebung von 7,6 auf 6,5 mittels Schwefelsäure vorgenommen. Nach der pH-Korrektur wurden die Bentonite zugegeben und nach einer einstündigen Absetzzeit wurden die Eliminationen bestimmt (Abb. 3). Die Trübung nimmt im Allgemeinen ab einem bestimmten Verhältnis von Tonpartikeln zu Trübstoffen zu, weil die mit den Abwasserschmutzstoffen nicht genügend beladenen Tonkolloide schlecht sedimentieren und dadurch selbst die Trübung im Ablauf verursachen. Die CSB-Elimination nähert sich asymptotisch an die 80%-ige Leistungsgrenze an.

Bei der Zugabe von Aluminiumsulfat wurde eine bessere Elimination als die oben gezeigten Eliminationswerte erzielt, wobei erhöhte Schlammvolumen und eine leichte Überdosierungsmöglichkeit zu beobachten sind. Beim weiteren Einsatz von Aluminiumsulfat in Kombination mit Bentonit wurde 60 mg Bentonit pro Liter zur Vorflockung gegeben, gefolgt von der Aluminiumdosierung. Durch das kombinierte Verfahren wurde eine wesentlich geringere Menge an Aluminium benötigt, um eine vergleichbare Elimination zu erreichen. Ein weiterer Vorteil dieser Kombination gegenüber Aluminium allein ist der geringe Schlammfall (MÖBIUS & ELBERT, 1978).

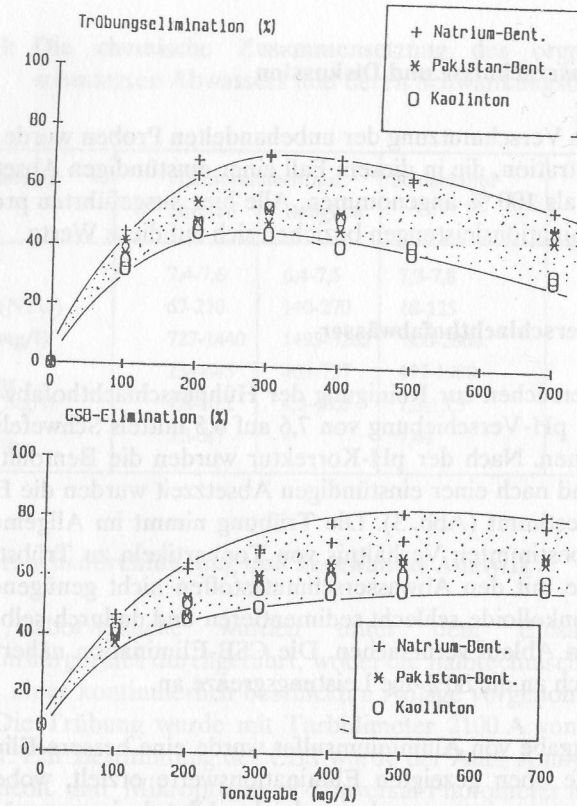


Abb. 3: Eliminationsleistung bei adsorptiver Reinigung des Hühnerschlachthofabwassers durch Tone nach der pH-Korrektur 7,6- > 6,5

Die Laborversuche und halbtechnischen Ergebnisse am AIT in Bangkok bestätigen die in Karlsruhe erzielten Laborergebnisse, wobei eine höhere Dosierung von Kaolinton nötig war. In der Tabelle 4 sind die Schwankungsbreiten der Belastungen und der Eliminationsrate angegeben. Trotz der starken Schwankung der Zulaufbelastung wurde ein beruhigter Ablaufwert erreicht. Insbesondere eine gute Schadstoffreduzierung ist bei anschließender Dosierung von Kalk festzustellen. Auch das Gesamtphosphat wird si-

gnifikant verringert. Dabei verursacht dieses Verfahren einen höheren Schlammfall gegenüber Verfahren ohne Kalk.

Tab. 4: Versuchsergebnisse zur Behandlung des Abwassers aus dem Hühnerschlachthof von Bangkok in der Pilotanlage bei pH = 6,0-8,0 und in Kombination von Aluminium (150-300 mg/l) und Kaolinton (200-400 mg/l)

Parameter	Zulauf	Ablauf	Reduktion (%)
Trübung (NTU)	140-270	12-66	73,0-92,0 [84,2]
CSB (mg/l)	1495-3262	400-770	72,2-78,0 [73,8]
BSB ₅ (mg/l)	533-1738	230-475	57,4-78,2 [68,8]
P _{Ges} (mg/l)	4,3-18,0	1,0-7,0	56,3-94,2 [75,2]
NH ₄ (mg/l)	55-102	41-79	12,7-24,5 [18,2]
NO ₃ (mg/l)	1,1-4,5	0,7-1,2	37,0-74,3 [57,4]
K _{jel.-N} (mg/l)	85-196	43-84	47,6-64,8 [55,0]

[] = arithmetische Mittelwerte

3.4.2 Schlachthofabwässer

Das Schlachthofabwasser enthält große Mengen an Blut und Innereien. Der Anteil an gelöstem Gesamtphosphat und CSB ist mit etwa 70 % stark vertreten. Ohne vorhergehende Veränderung des pH-Wertes kann man kaum eine nennenswerte Elimination erwarten. Nach der pH-Doppelverschiebung ist der CSB-Ablauf akzeptabel. Die Bentonit-Zugabe erfolgt nach der pH-Einstellung auf 3,3. Anschließend wird Kalk zugesetzt. Dadurch erzielt man wesentlich höhere Eliminationsraten (Abb. 4).

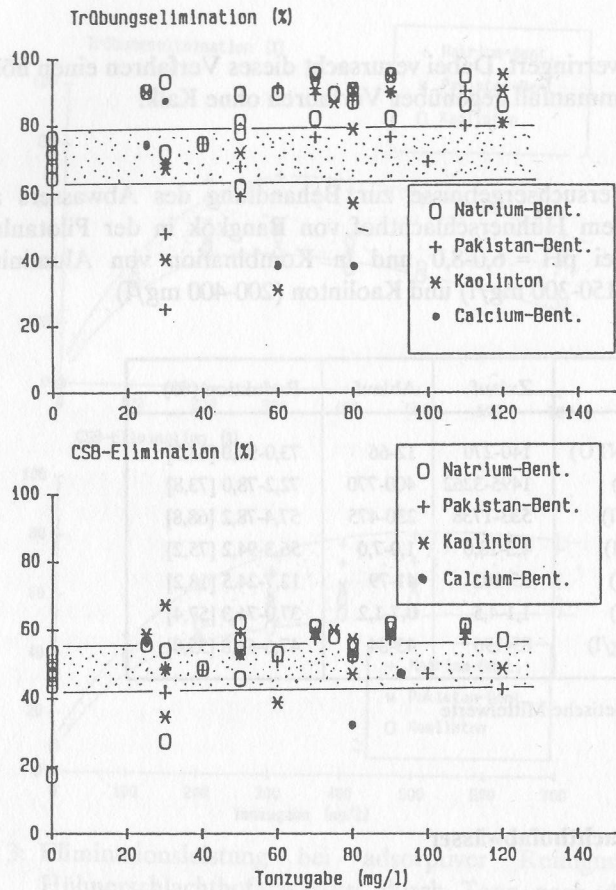


Abb. 4: Eliminationsleistung bei Schlachthofabwasser durch die Tonzugabe nach der pH-Korrektur 7,5->3,3 und anschließende Kalkdosierung (pH->6,8)

Aus den hier gewonnenen Ergebnissen läßt sich über den Einsatz von Bentoniten zur Reinigung des Schlachthofabwassers folgendes sagen: die bei den Versuchen erzielte Elimination des CSB von 72 %, der Trübung von 95 % und des Gesamtphosphates von 68 % kann durch verbesserte Randbedingungen wahrscheinlich noch erhöht werden.

3.4.3 Gerbereiabwässer

Bei der Reinigung des Gerbereiabwassers wurde die doppelte pH-Verschiebung in umgekehrter Reihenfolge vorgenommen. Durch anschließende Zugabe von 12,2 mg Aluminium pro Liter wurden der CSB um 45 %, das Gesamtphosphat um 80 % und die Trübung um 85 % reduziert. Das Abwasser aus dem Gerbereibetrieb läßt sich durch die Kombination von Aluminium und Bentoniten bei einem pH von 6,5 behandeln. Bei der Aluminiumzugabe mit 80 mg Na-Bentonit/l zur Vorflockung wurde eine um 10 % höhere Elimination von CSB und Trübung und eine 15 % höhere Reduzierung von Gesamtphosphat im Vergleich mit alleiniger Dosierung von Aluminium erreicht (Abb. 5).

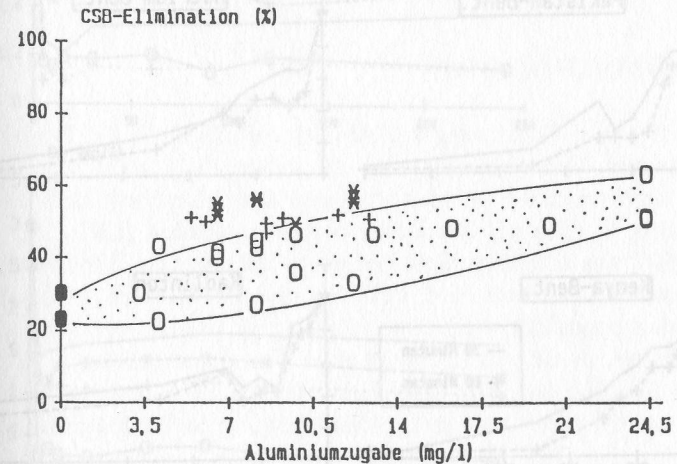


Abb. 5: Eliminationsleistung im Vergleich zwischen Al^{3+} und in Kombination mit 80 mg/l Bentonit zur Vorflockung nach der pH-Korrektur 8,5->9,5

3.4.4 Abwässer aus der Oberflächenveredelung

Die Adsorption der Schwermetalle an Bentonite wurde im Labor untersucht. Dabei wurde ein suspensarmes Nachklärbeckenablauf-

wasser aus einer kommunalen Kläranlage verwendet. Da die Schwermetallkonzentration im Abwasser für die Analytik zu gering war, wurden die fünf verschiedenen Schwermetalle jeweils in Konzentrationen von ca. 1,0 mg/l zusammen zugegeben. Die Bentonite wurden in Form von Pulver direkt und als gequollene Dispersion in unterschiedlicher Menge zugesetzt. Dabei bringt die aufgequollene Dispersion eine bessere Adsorption mit sich. Die Elimination der Schwermetalle, z.B. Zink, an Bentonit bei einem pH-Wert von 7,2 wurde in Abbildung 6 dargestellt. Die Eliminationsrate der Schwermetalle ist unterschiedlich, je nach Art der Schwermetalle und der Bentonite (TILLMANN, 1982; XANTHOPOULOU, 1985).

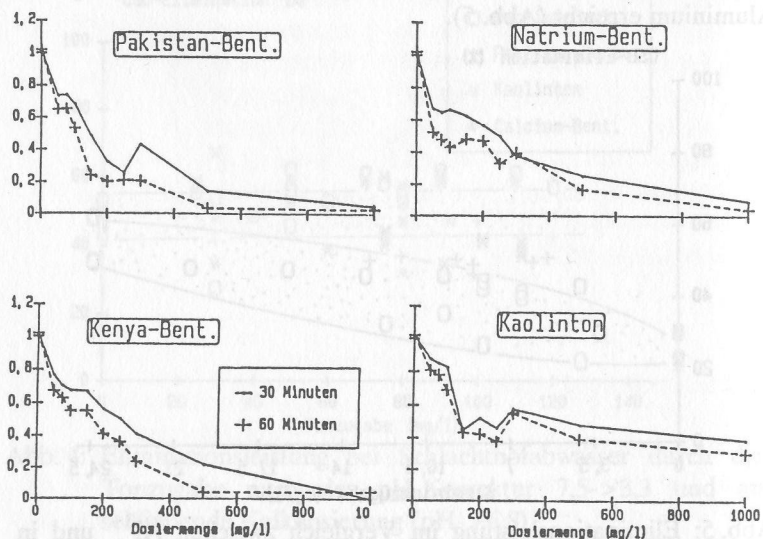


Abb. 6: Zinkadsorption an Bentonite bei einstündiger Adaptionszeit und einem pH-Wert von 7,25

Bei der Cu-Adsorption an 300 mg Bentonit pro Liter wurde langfristig langsam gerührt. Jeweils eine Probe wurde nach dem bestimmten Zeitintervall entnommen und analysiert (Abb. 7). Dabei läßt sich feststellen, daß die Adsorption an Bentonit schnell abläuft und die Anlagerung eine labile Verbindung sein kann. Insbeson-

dere die Adsorption an Bentonit hängt zusätzlich noch von den Schwermetallkonzentrationen des zu behandelnden Abwassers ab. Je höher die Konzentration in der Lösung ist, desto größere Mengen werden durch Bentonit adsorbiert.

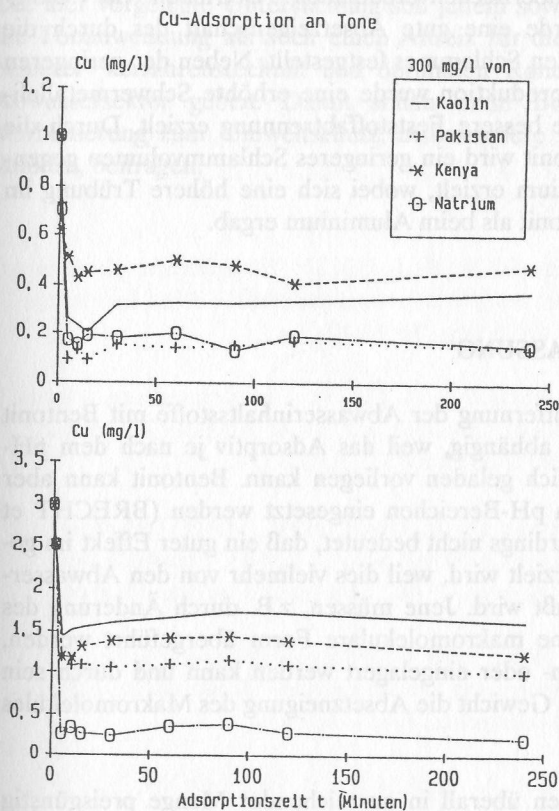


Abb. 7: Zeitabhängige Cu-Adsorption an Bentonit bei 300 mg/l und einem pH-Wert von 7,2

Die wichtigsten Verfahren zur Reinigung der Abwässer aus der Oberflächenveredelung sind die Cyanid- und Chrom-Entgiftung, Neutralisation und die damit verbundene Schwermetallfällung so-

wie die Feststoffabtrennung mit anschließender Schlammbehandlung und -beseitigung.

Bei den halbertechnischen Versuchen für die Reinigung der Abwässer aus den oberflächenveredelnden Betrieben in Bangkok/Thailand wurde eine gute Absetzeigenschaft des durch die Bentonite gebildeten Schlammes festgestellt. Neben der geringeren Schlammvolumenproduktion wurde eine erhöhte Schwermetallelimination und eine bessere Feststoffabtrennung erzielt. Durch die Zugabe von Bentonit wird ein geringeres Schlammvolumen gegenüber dem Aluminium erzielt, wobei sich eine höhere Trübung im Ablauf beim Bentonit als beim Aluminium ergab.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die adsorptive Entfernung der Abwasserinhaltsstoffe mit Bentonit ist vom pH-Wert abhängig, weil das Adsorptiv je nach dem pH-Wert unterschiedlich geladen vorliegen kann. Bentonit kann aber allgemein in allen pH-Bereichen eingesetzt werden (BRECHT et al., 1974), was allerdings nicht bedeutet, daß ein guter Effekt im gesamten Bereich erzielt wird, weil dies vielmehr von den Abwasserkolloiden beeinflußt wird. Jene müssen, z.B. durch Änderung des pH-Wertes, in eine makromolekulare Form übergeführt werden, wobei Bentonit an- oder eingelagert werden kann und durch sein hohes spezifisches Gewicht die Absetzneigung des Makromoleküles erhöht.

Tonminerale stehen überall in ausreichender Menge preisgünstig zur Verfügung. Bei der Anwendung der Tonminerale zur Abwasserreinigung ist kein negativer Einfluß auf die Qualität des geklärten Abwassers und des gebildeten Schlammes zu erwarten, sodaß der abgeschiedene Schlamm weiter genutzt werden kann. Insbesondere verbessern die Tonminerale in der Regel die Flockungs- und Sedimentationseigenschaften anderer Flockungsmittel (HOPPE & TÄGLICH, 1982). Die quellfähigen Dreischichtmine-

rale bilden in wäßriger Phase sogar selbst flockungsfähige Dispersionen.

Die hier vorgelegte Untersuchung soll jedem sowohl Hinweise auf die Tonanwendung als auch einen Anreiz für die Suche nach geeigneter Verfahrenstechnik und optimalen Randbedingungen im Abwassersektor geben. Damit sollen diese Bodenschätze eine Verbesserung zum Umweltschutz, insbesondere in Entwicklungsländern, beitragen.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- BRECHT, W., BÖRNER, F. & DALKE, H.-L. (1974): Über die Wirksamkeit von Abwasserbentonit zur Klärung von Papierfabrikwässern.- *Das Papier*, **28**, 3, 89-97.
- HOFMANN, U. & BILKE, W. (1936): Über die innerkristalline Quellung und das Basenaustauschvermögen des Montmorillonits.- *Kolloid-Zeitschrift*, **77**, Heft 2, 238-251.
- HOPPE, H. & TÄGLICH, H.J. (1982): Tonminerale als Adsorbenten für Wasserschadstoffe.- *Acta hydrochem. hydrobiolog.*, **10**, 69-83.
- MÖBIUS, Ch. & ELBERT, H. (1978): Die Behandlung galvanischer Abwasser mit dem Flygtol-G-Verfahren.- *Galvanotechnik*, **69**, 2, 122-129.
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., HARTGE, K.-H. & SCHWERTMANN, U. (1984): *Lehrbuch der Bodenkunde*.- 1-442, Stuttgart (Ferdinand Enke).
- TILLMANN, W. (1982): Zur Bedeutung der Tonminerale als Adsorbens für Schwermetalle.- *Tonindustrie-Zeitung-Fachberichte*, **106**, 2, 137-139.
- WEISS, A., MEILER, A., KOCH, G. & HOFMANN, U. (1956): Über das Anionenaustauschvermögen der Tonminerale.- *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, **284**, 247-271, 16 Abb.

- XANTHOPOULOU, J. (1985): Untersuchungen zum Einsatz von Schichtsilikaten und Flockungshilfsmitteln zur Schwermetalleliminierung in der weitergehenden Abwasserreinigung. Vertiefungsarbeit im Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, 1-50.

W. XIANG

Department of Hydrogeology and Engineering Geology
Chong University of Geosciences
Wuhan, P.R. China

ZUSAMMENFASSUNG

Der Zusammenhang zwischen dem Tongehalt und der Scherfestigkeit von Tonzwischenräumen wird quantitativ erfasst und durch eine mathematische Formel ausgedrückt.
Desweiteren wird der Mechanismus dieses Zusammenhangs mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) aufgezeigt. Als Ursache für den Zusammenhang sind unterschiedliche Mikrostrukturen bei verschiedenen Tongehalten anzusehen.

ABSTRACT

The correlation between clay fraction and shear strength of weak intercalations is expressed by a mathematical formula.
Furthermore the mechanism of the connection is shown by means of a Rasterelectron microscope (REM). The author considers that the cause of the correlation is different microstructures by varied clay fractions.