

Sanierung kohlenwasserstoffkontaminierter Tone mit nichtionischen Tensiden - Untersuchungen zum Mikrogefüge und Schadstoffaustrag -

R. Haus

Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität (TH) Karlsruhe
Kaiserstraße 12, D-76128 Karlsruhe

KURZFASSUNG

In Laborversuchen wurden verschiedene Tone in Doppelringpermeameter verdichtet eingebaut und mit einem aromatischen Mineralölkohlenwasserstoff (o-Xylol) kontaminiert. Im Anschluß wurden die Probenkörper mit einer BRIJ 35-Niotsidlösung durchströmt. Im Eluat wurde der Verlauf der Schadstoffkonzentration während der Perkolation ermittelt und Veränderungen im Mikrogefüge der Tone als Folge der Sanierungsmaßnahme mittels porosimetrischer Methoden dokumentiert.

Die Durchströmung der Tonproben führte schon nach kurzer Zeit zu einer deutlichen Abnahme der anfänglich hohen Schadstoffgehalte im Eluat. In nicht quellfähigen Tonen entwickelte sich zumeist eine inhomogene Durchströmung entlang größerer, während der Kontamination gebildeter Trennflächen. In Tonen mit erhöhtem Mikroporenvolumen konnte ein scheinbar rascher Sanierungserfolg erzielt werden, jedoch war eine erhebliche Residualsättigung zu vermuten. Das Mikrogefüge wurde durch die Niotsidlösung nur gering beeinflusst. Während der Tensidspülung konnte eine verstärkte Aggregatstabilität nachgewiesen werden.

EINLEITUNG

Mineralölschadensfälle liegen mit etwa 93% aller Unfälle mit wassergefährdenden Stoffen einsam an der Spitze. Bei annähernd 1500 Unfällen pro Jahr versickern durchschnittlich 2700 m³ Mineralöl ins Erdreich (UBA 1990). Die durchschnittliche Rückgewinnung durch Absaugen und Aushub liegt nach Angaben des Umweltbundesamtes bei nur 30-40%, was auf eine hohe Residualsättigung des Untergrundes und somit bleibende Gefährdung der Umwelt schließen läßt. Aus diesem Grund ist für die Sanierung mineralölkontaminierter Flächen neben den konventionellen Maßnahmen der Einsatz von Mikrobakterien mittlerweile Stand der Technik (DVWK 1991).

Nach einer Empfehlung der LfU Baden-Württemberg (LfU-BW 1991) werden für eine erfolgreiche biotechnologische In Situ-Sanierung des mineralölkontaminierten Untergrundes anstehende Lockergesteine mit Durchlässigkeitsbeiwerten $k_f > 5 \cdot 10^{-4}$ m/s vorausgesetzt. Derart starke Gesteinsurchlässigkeiten werden jedoch nur in Sanden und Kiesen erreicht. Schluffig-tonige Sedimente sind demnach für eine biologische In Situ-Sanierung nicht geeignet.

Eine mangelnde Sauerstoff- und Nährstoffversorgung aufgrund der geringen Durchlässigkeiten und sehr geringe Porenöffnungsweiten toniger Sedimente verhindern das Einwandern der Mikrobakterien in die Feinklastika. Bei zu geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Spülkreislauf einer hydraulischen Sanierungsmaßnahme kann zudem der Porenraum während des Wachstums der Bakterien durch Bioadsorption verstopft werden. Ungünstig für die mikrobielle Sanierung ist ebenso das Vorliegen der Kontaminanten in Phase, da Mikrobakterien die Schadstoffe nur in gelöster Form abbauen können und zu hohe Schadstoffkonzentrationen zudem toxisch wirken. Der mikrobielle Abbau erfolgt demnach bevorzugt in der wässrigen Phase oder an der Grenzfläche zwischen organischer und wässriger Phase.

Neben dem raschen Schadstofftransport ist für die Sanierungstechnik vor allem das hohe Rückhaltevermögen von Tonen, Tonlinsen und tonigen Böden von großer Bedeutung

(WALZENBACH 1991). Gerade in gut durchlässige Schichten eingebettete Tonhorizonte und Tonlinsen sind deshalb als ständige Gefährdungsquellen für das Grundwasser anzusehen.

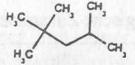
Aus diesem Grunde wird gerade von mikrobiologischer Seite der Einsatz von Lösungsvermittlern diskutiert (TIEHM 1994). Die Zugabe oberflächenaktiver Substanzen kann über die Umbelegung der Partikeloberflächen eine Reduzierung der Residualsättigung ermöglichen (RÜDDIGER 1987). Die Kontaminationen werden verstärkt aus den gering durchlässigen Schichten herausgelöst und so dem mikrobiellen Abbau zugeführt.

Die Wirkungsweise und der Schadstoffaustrag wird durch die gute Umsetzungsfähigkeit der Tenside erreicht. Tenside sind amphipatische Moleküle, die aus einer hydrophilen und einer hydrophoben Gruppe gebildet werden. In wässriger Lösung bilden Tenside bei genügend hohen Konzentrationen kolloidale Aggregate, sog. Micellen. Im Innern einer Micelle können hydrophobe Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) aufgenommen und deren Löslichkeit gesteigert werden. Im Idealfall wird der als Ölschicht vorliegende Schadstoff von der Partikeloberfläche abgelöst und solubilisiert.

MATERIAL

Um die Auswirkungen eines Tensideinsatzes sowohl auf einen gesteigerten Sanierungserfolg wie auch auf das Gefüge von Tonen zu erfassen, wurde eine beispielhafte Sanierung kontaminierter Bodenproben im Labor durchgeführt. Mineralöle bestehen überwiegend aus aromatischen und aliphatischen Kohlenwasserstoffen. Die chemische Zusammensetzung von Vergaserkraftstoff wird von BTX-Aromaten und i-Oktan dominiert (Tab. 1). Beide Stoffe sind entsprechend ihrer niedrigen Dielektrizitätskonstante (DK) unpolar und nur gering wasserlöslich. Das niedrige Sanierungsziel der LfU-BW für Xylol und MKW unterstreicht die wassergefährdende Relevanz dieser Stoffe.

Tabelle 1: Chemisch-physikalische Parameter der Testflüssigkeiten (überw. aus LIDE 1993)

	Einheit	o-Xylene	i-Octan	H ₂ O
chemische Benennung		1,2-Dimethylbenzen	2,2,4-Trimethylpentan	Wasser
Struktur				
Summenformel		C ₈ H ₁₀	C ₈ H ₁₈	H ₂ O
Molekulargewicht	g/Mol	106,17	114,23	18,02
DK [20 °C]		2,6	1,9	80,2
Dipolmoment	debye	0,45	0	1,89
Dichte [20 °C]	g/cm ³	0,880	0,69	0,998
Löslichkeit in H ₂ O [20 °C]	g/l	0,198	0,1	-
Gehalt im Vergaserkraftstoff	%	3-23	2-48	-
Sanierungsziel (LfU - BW 1993)	µg/l	10	50	-

Nach Absprache mit dem Lehrstuhl für Mikrobiologie der Universität Karlsruhe fand als Lösungsvermittler das für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) bereits bewährte

und vom Abbauschema geeignete Niotensid BRIJ 35 Verwendung (TIEHM 1994). Es gehört zur Familie der substituierten Polyethylenglycol(PEG)-Ether, in der die hydrophile PEG-Gruppe über eine Etherbrücke mit einem hydrophoben Alkylrest verbunden ist (Tab. 2).

Tabelle 2: Chemische Eigenschaften des Niotensides BRIJ 35

Summenformel	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_{23}\text{H}$
Übergeordnete Gruppe	nichtionische Tenside (Niotenside) Alkoholethoxylate
Bezeichnung	Dodecyl-polyethylenglycol-ether
Synonyme	Dodecyl-polyoxyethylen-ether PEG(23)-laurylether
HLB	17
Molekulargewicht [g/mol]	1199
Micelldurchmesser ca. [nm]	24
Aggregationszahl	40
CMC [mol/l]	8,5 E-5
Hydroxylzahl	45-50

Im Gegensatz zu den ionogenen Tensiden sind die allgemeinen Vorteile nichtionischer Tenside:

- keine permanente Ladung
- geringes Adsorptionsvermögen an Bodenteilchen
- günstige HLB-Werte
- sehr gute Löslichkeit in Wasser
- niedrige Micellbildungskonzentration (CMC)
- starke Umnetzungsfähigkeit

Die ausgewählten Tone waren von den hierzulande häufigsten Tonmineralen Kaolinit, Illit und Ca-Smectit dominiert (Tab. 3). Diese Tonminerale waren zugleich Hauptbestandteile eines Keuper-Tones aus dem Lettenkeuper Südwestdeutschlands. Keuper-Tone sind in Baden-Württemberg weit verbreitet und stellen große Problemfälle bei der Sanierung dar.

Tabelle 3: Mineralogische Zusammensetzung [%] der Tone

	Illit	Kaolin	Ca-Bentonit	Keuper-Ton
Quarz	64	15	17	23
Calcit	1	2,5	4	3
Dolomit	1	-	-	25
Smectit	6	1	59	17
Illit	25	5	3	22
Kaolinit	1	76	5	5
Cristobalit	-	-	3-10	-
Organik	2	0,5	3	5

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Tone wurden mit dem Wassergehalt der Ausrollgrenze (w_p) befeuchtet und proctorverdichtet in Doppelpingpermeameter eingebaut. Anschließend wurden sie mit o-Xylol beaufschlagt.

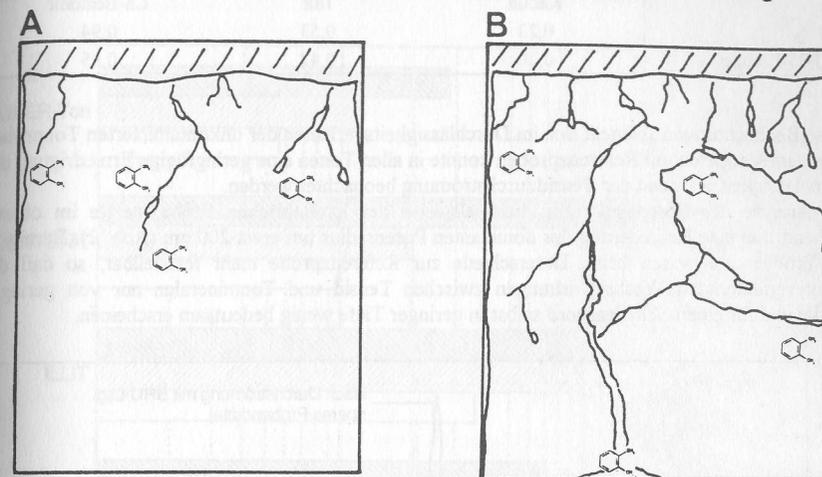


Abb. 1: Modellhafter Kontaminationsverlauf einer Tonprobe nach dem Kontakt mit o-Xylol.

Die Analyse des Mikrogefüges zeigte mit fortschreitender Kontamination eine Schrumpfung der wassergesättigten Proben und die Ausbildung bevorzugter Wegigkeiten in Form von Zugrissen und Großporen (Abb. 1A). Die unpolaren Kohlenwasserstoffe drangen immer tiefer in den Ton ein, die kontaminierte Oberfläche vergrößerte sich und der Prozeß wurde verstärkt. Der konvektive Schadstofftransport vollzog sich zunehmend entlang der progressiv sich weitenden Mikrorisse (Abb. 1B). Die Randbereiche der schadstoffgefüllten Wegigkeiten wurden durch diffusive Transportprozesse weiter kontaminiert. Es entstand ein Zwei-Phasen-Fluß, wobei die unpolare Flüssigkeit, neben dem in kleinen Poren mit hoher Kapillarspannung festgehaltenen Wasser, transportiert wurde.

Nach mehrmonatiger Kontamination wurden die Probenkörper mit einer BRIJ 35-Lösung ($c_{\text{BRIJ 35}} = 1\text{g/l}$) beaufschlagt und mit einem durchschnittlichen hydraulischen Gradienten von $I = 30$ durchströmt. Die Schadstoffkonzentration im Eluat wurde gaschromatographisch ermittelt. Veränderungen im Mikrogefüge der Tone als Folge der Sanierungsmaßnahme wurden nach der Durchströmung mittels stickstoff- und quecksilberporosimetrischer Methoden sowie REM-Aufnahmen dokumentiert.

ERGEBNISSE

Um den möglichen Einfluß einer wässrigen BRIJ 35-Lösung auf das Mikrogefüge der Tone abschätzen zu können, wurden im Vorhinein mit je 2 g dispergiertem Ton vergleichende Sedimentationsversuche in 40 ml BRIJ-Lösung und destilliertem Wasser durchgeführt (Tab. 4). In der Tensidlösung konnte für alle Tone ein deutlich geringeres Sedimentvolumen als in reinem Wasser festgestellt werden, was auf eine mögliche Vernetzung der Tonminerale über Tensidbrücken zurückzuführen ist (MOUDGIL et al. 1988; THENG, 1979).

Tabelle 4: Sedimentquotient (Sedimenthöhe/Gesamthöhe der Lösung) der Tone in wässriger BRIJ 35-Lösung und destilliertem Wasser.

Dispersionsmedium	Sedimentquotient		
	Kaolin	Illit	Ca-Bentonit
H ₂ O	0,23	0,53	0,94
BRIJ 35-Lösung	0,20	0,42	0,85

Diese Beobachtungen spiegeln sich im Durchlässigkeitsverhalten der unkontaminierten Tonproben wider. Im Vergleich mit Referenzproben konnte in allen Tönen eine geringfügige Erniedrigung der Durchlässigkeit während der Tensiddurchströmung beobachtet werden.

Die Analyse des Porenspektrums, beispielsweise der kaolinitischen Probe, zeigte im oberen Probedrittel eine Reduzierung des dominanten Porenradius um etwa 200 nm (Abb. 2). Bereits in der Probenmitte waren keine Unterschiede zur Referenzprobe mehr feststellbar, so daß die gefügeverändernden Wechselwirkungen zwischen Tensid und Tonmineralen nur von geringer Stärke und für einen Schadensherd selbst in geringer Tiefe wenig bedeutsam erscheinen.

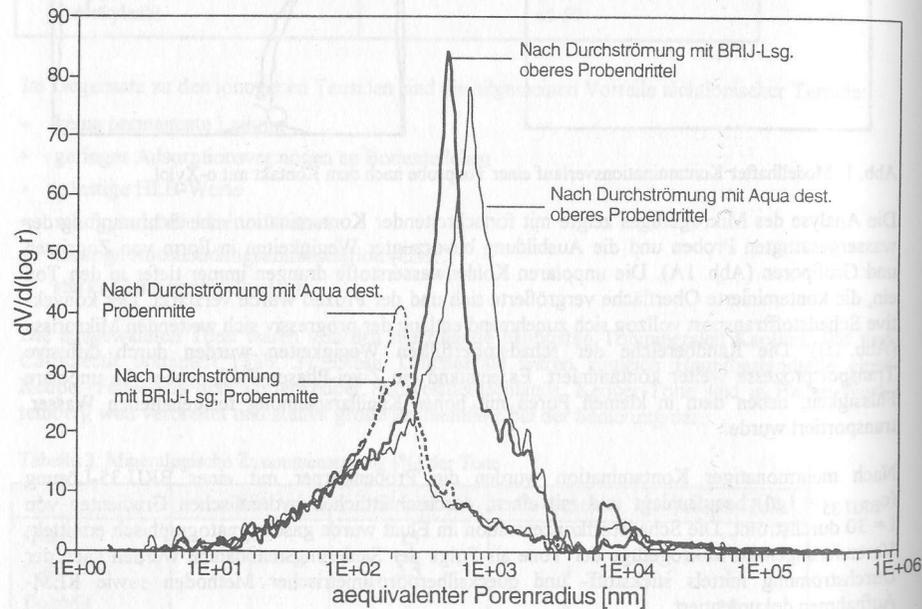


Abb. 2: Makroporenspektrum von Kaolin vor und nach der Durchströmung mit einer BRIJ 35-Lösung.

Nach der Kontamination der wassergesättigten Tone mit o-Xylol wurden die Probenkörper mit einer BRIJ 35-Lösung durchströmt, um eine beispielhafte Sanierung im Labormaßstab nachzuvollziehen.

Mit zunehmender Perkolationsdauer schlossen sich die bevorzugten Wegigkeiten makroskopisch und die Durchlässigkeiten nahmen allgemein ab. Die Quellung des Ca-Bentonites führte zur

stärksten Permeabilitätserniedrigung. Mit abnehmendem Gehalt an quellfähigen Tonmineralphasen blieben durchflußwirksame Trennflächen bestehen und die Durchlässigkeit nahm weniger stark ab. Die Durchlässigkeiten blieben auch nach mehrmonatiger Dekontamination gegenüber den Permeabilitätswerten der unkontaminierten Proben deutlich erhöht (Abb. 3).

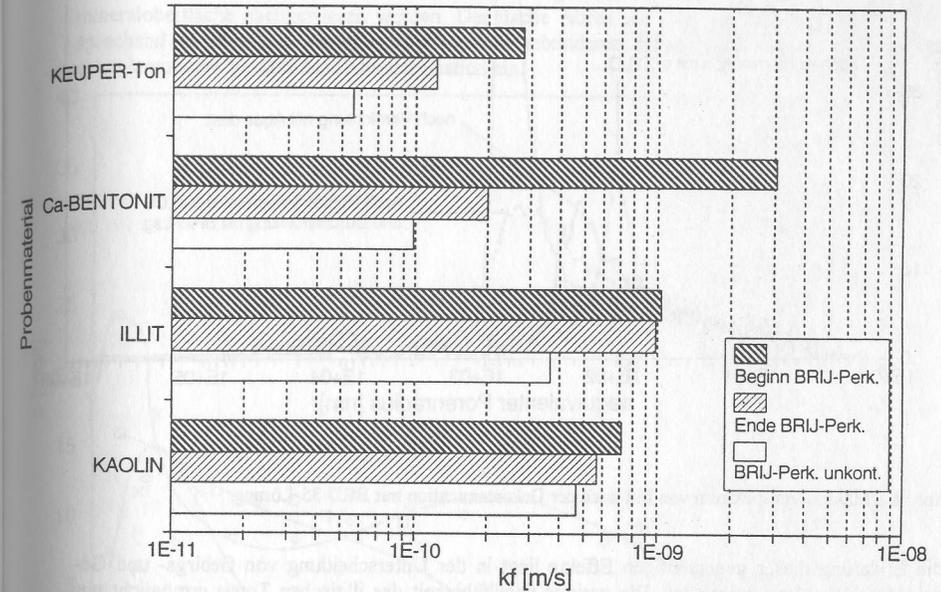


Abb. 3: Durchlässigkeiten der unkontaminierten und kontaminierten Tone zu Beginn und Ende der Durchströmung mit BRIJ 35-Lösung ($c=1 \text{ g/l}$).

Das Makroporenspektrum des illitischen Tones verdeutlicht noch einmal die Gefügeentwicklung während der Kontaminations- und Sanierungsphase. Die Kontamination mit Xylol führte zu einer Aggregation der Tonminerale, Reduzierung des interkristallinen Porenvolumens, Verengung der Interaggregatporen und somit Schrumpfung der Probe, wobei sich als Schrumpfrisse ausgebildete Strömungskanäle bildeten (HAUS 1993). Die anschließende Durchströmung mit Tensidlösung führte infolge Quellung wieder zu einer Erweiterung der Interaggregatporen. Die Aggregation der Tonminerale im Verlauf der Kontamination ist dabei von hoher Beständigkeit, da das Porenvolumen der Interaggregatporen, verglichen mit einer unkontaminierten Probe, deutlich erniedrigt blieb (Abb. 4). Trotz des reduzierten Porenvolumens der Interaggregatporen war die Durchlässigkeit der kontaminierten Probe erheblich erhöht.

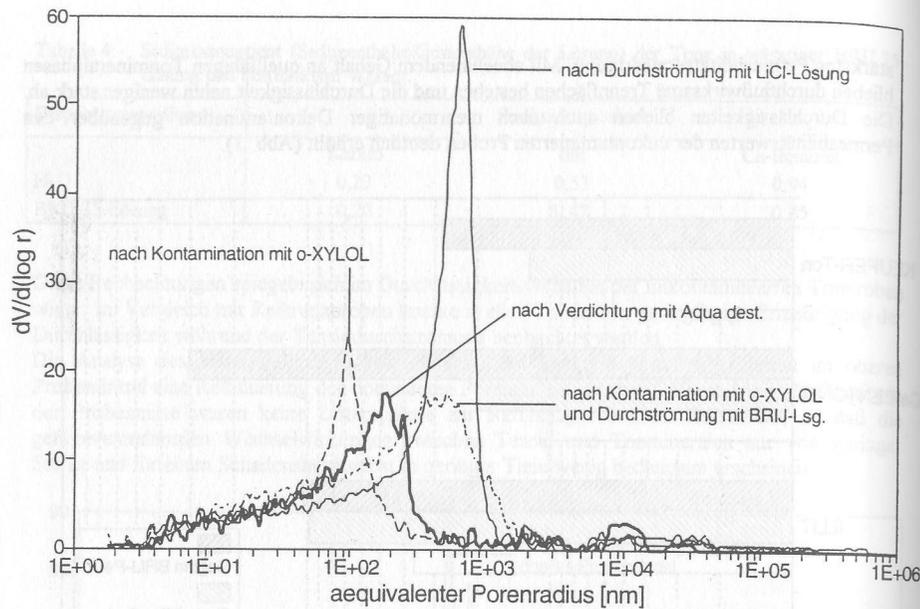


Abb. 4: Makroporenspektrum von Illit nach der Dekontamination mit BRIJ 35-Lösung.

Die Erklärung dieser gegenläufigen Effekte liegt in der Unterscheidung von Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit begründet. Die geringe Quellfähigkeit des illitischen Tones ermöglicht nur scheinbar eine Schließung der Makrorisse, bevorzugte Strömungsbahnen bleiben bestehen. Die ermittelte Permeabilität nach der Tensiddurchströmung des illitischen Tones entspricht der "Gebirgsdurchlässigkeit" der Probe, der Maßstab des untersuchten Porenspektrums hingegen erfaßt nur den homogenen Bereich zwischen den bestehenden Trennflächen.

Zwischenfazit

Zusammenfassend ist festzustellen, daß Tone mit vorwiegend nicht quellfähigen Tonmineralen als Folge der Kontamination bleibende Gefügeveränderungen auch während der Tensidreinigung zeigen.

Die Tensidlösung strömt entlang bevorzugter Wegigkeiten, eine inhomogene Dekontamination ist die Folge. Smectitisch dominierte Tone hingegen sind in der Lage, Trennflächen aufgrund ihres Quellvermögens vollständig zu schließen und somit einen homogenen Schadstoffaustrag zu gewährleisten.

Während der Dekontamination der Tone wurden die Schadstoffgehalte im Eluat ermittelt. Die Desorptionscharakteristik der unterschiedlichen Tone ist entscheidend für die Residualsättigung und den späteren Sanierungserfolg.

Die Desorption des BTX-Aromates o-Xylol unterstreicht die starke Abhängigkeit des Sanierungsverlaufes vom dominierenden Tongehalt und dem Porenspektrum im tonigen Untergrund (Abb. 5).

Mit Ausnahme des Kaolin beginnt der Desorptionsverlauf der untersuchten Tone mit niedrigen Kontaminationswerten. Mit fortgesetzter Durchströmung steigt die Xylolkonzentration an und fällt nach ein bis zwei durchströmten Porenvolumen deutlich ab.

Die Höhe des initialen Anstiegs der Xylolkonzentration entspricht den aus Gasadsorptionsisothermen ermittelten Adsorptionskapazitäten der dominierenden Tonminerale (HAUS 1993).

Für den Kaolin konnten die stärksten Bindungskräfte der Xylol-Moleküle mit der Tonmineraloberfläche nachgewiesen werden. Der flache Abfall der Desorptionskurve bestätigt entsprechend die zögerliche Abgabe der relativ fest gebundenen Schadstoffmoleküle und deutet auf einen langsamen Verlauf der Dekontamination hin.

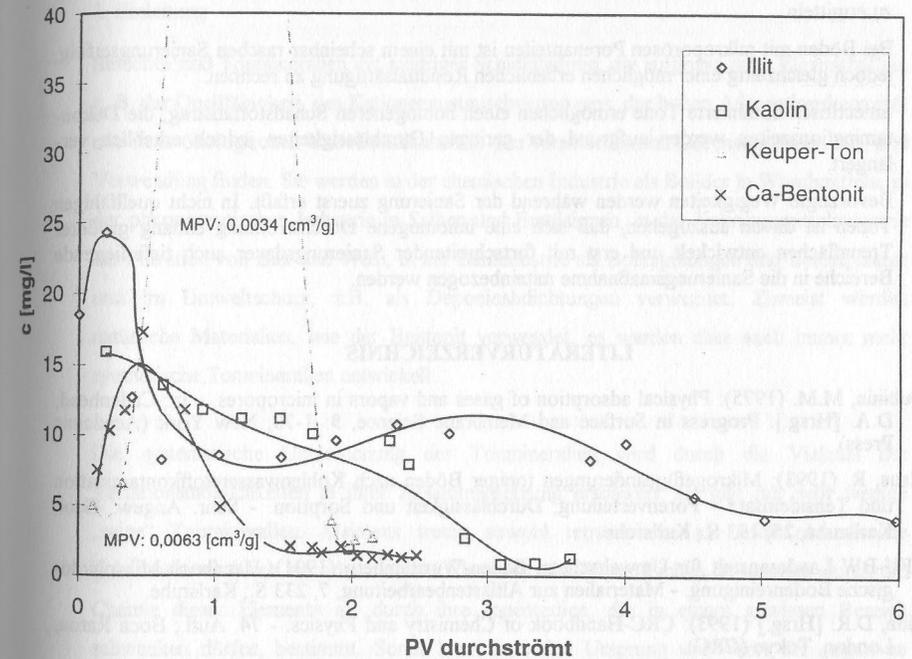


Abb. 5: Konzentrationsverlauf von o-Xylol während der Durchströmung wassergesättigter, kontaminierter Tone mit BRIJ 35-Lösung (Messwerte und Kurvenanpassung).

Beim smectitisch und illitisch dominierten Ton wurden sehr schnell niedrige Kontaminationswerte erreicht. Die schwachen Wechselwirkungskräfte der Xylol-Moleküle mit der äußeren Oberfläche und die starken Hydratationskräfte der Gegenionen ermöglichen eine schnelle Lösung der sorbierten Schadstoffmoleküle, den raschen Abtransport und das Erreichen niedriger Xylolkonzentrationen.

Für die Adsorption und Bindungsstärke besonders wichtig sind Mikroporen mit einem Durchmesser < 2 nm. Durch überlappende Adsorptionspotentiale der Porenwandung ist die Physisorption der eingelagerten Moleküle bedeutend stärker als auf der freien Oberfläche (DUBININ 1975). Der Desorptionsverlauf von Ca-Bentonit und Keuper-Ton belegt in Form einer langanhaltenden stetigen Abgabe geringer Schadstoffmengen eine verstärkte Bindung der Xylol-Moleküle im Mikroporenraum dieser Tone.

Beim illitischen Ton wurden zu Beginn der Sanierungsmaßnahme primär bevorzugte Wegigkeiten durchströmt und die Schadstoffe entlang der Trennflächen rasch herausgelöst. Der

Kontaminationsanstieg im Eluat ist entsprechend steil, fällt nach kurzer Durchströmungsdauer jedoch ebenso schnell wieder ab. Erst danach wurden tieferliegende Kontaminationsbereiche von der Tensidlösung erfaßt. Aufgrund der schwachen Schadstoffbindung konnten, über erhebliche Zeiträume hinweg, erhöhte Kontaminationswerte ermittelt werden.

Folgerungen für die Sanierungspraxis:

- Insgesamt ist bei der Durchströmung verschiedener Tone mit BRIJ 35-Niotensidlösung nach Austausch der ersten Porenvolumina eine deutliche Abnahme der Schadstoffgehalte im Eluat zu ermitteln.
- Bei Böden mit mikroporösen Porenanteilen ist mit einem scheinbar raschen Sanierungserfolg, jedoch gleichzeitig einer möglichen erheblichen Residualsättigung zu rechnen.
- Smectitisch dominierte Tone ermöglichen einen homogeneren Schadstoffaustrag, die Dekontaminationszeiten werden aufgrund der geringen Durchlässigkeiten jedoch erheblich verlängert.
- Bevorzugte Wegigkeiten werden während der Sanierung zuerst erfaßt. In nicht quellfähigen Tonen ist davon auszugehen, daß sich eine inhomogene Durchströmung entlang größerer Trennflächen entwickelt und erst mit fortschreitender Sanierungsdauer auch tieferliegende Bereiche in die Sanierungsmaßnahme miteinbezogen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- Dubin, M.M. (1975): Physical adsorption of gases and vapors in micropores. - In: Cadenhead, D.A. [Hrsg.]: Progress in Surface and Membrane Science, 9: 1-70; New York (Academic Press).
- Haus, R. (1993): Mikrogefügeänderungen toniger Böden nach Kohlenwasserstoffkontamination und Tensideinsatz - Porenverteilung, Durchlässigkeit und Sorption. - Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, 25, 193 S.; Karlsruhe.
- LFU-BW Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg (1991): Handbuch Mikrobiologische Bodenreinigung. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, 7, 233 S.; Karlsruhe.
- Lide, D.R. [Hrsg.] (1993): CRC-Handbook of Chemistry and Physics. - 74. Aufl.; Boca Raton, London, Tokyo (CRC).
- Moudgil, B.M., Soto, H. & Somasundaran, P. (1988): Adsorption of Surfactants on Minerals. - In: Somasundaran, P., Soto, H. & Moudgil, B.M. [Eds.]: Reagents in mineral technology. - Surf. Sci. Ser., 27: 79-104; New York.
- Theng, B.K.G. (1979): Formation and properties of clay-polymer complexes. - Develop. Soil Sci., 9: 362 S.; Amsterdam, Oxford, New York (Elsevier).
- Tiehm, A. (1994): Der Einfluß von Tensiden auf die Mobilisierung und den mikrobiellen Abbau von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen. - Diss. Univ. Karlsruhe, 107 S.; Karlsruhe.
- UBA Umweltbundesamt (1990): Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe - Beurteilung und Behandlung von Mineralölschadensfällen im Hinblick auf den Grundwasserschutz. - 143 S.; Berlin.
- Walzenbach, J. (1991): Mineralöle in Locker- und Festgesteinen - Untersuchungen zur Durchlässigkeit, Saugspannung und Kapillarität. - Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, 12, 152 S.; Karlsruhe.

Smectite - Synthese und Röntgenstrukturanalyse am Beispiel von Fluorohectorit

W. Kagermeier und K.-J. Range, Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg

1. Einleitung

Smectite sind Tonminerale mit niedriger Schichtladung, die aufgrund ihrer Eigenschaften, z. B. der Quellfähigkeit, des Kationenaustauschvermögens, der hohen Adsorptionskapazität und ihrer ökologischen Unbedenklichkeit in den verschiedensten Lebensbereichen Anwendung finden. Sie werden in der chemischen Industrie als Builder in Waschmitteln, in der pharmazeutischen Industrie in Salben und Emulsionen, in der Nahrungsmittelindustrie zur Filtration von Bier und Wein, in der Bauindustrie als Bohrspülungen und Betonzusätze und im Umweltschutz, z.B. als Deponieabdichtungen verwendet. Zumeist werden natürliche Materialien, wie der Bentonit verwendet, es werden aber auch immer mehr synthetische Tonminerale entwickelt.

Die systematische Untersuchung der Tonminerale wird durch die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten in ihrer Zusammensetzung erschwert. Es gibt nur sehr wenige „reine“ Tonminerale. Meistens treten sowohl tetraedrische als auch oktaedrische Substitutionen durch ein oder mehrere Elemente auf. Dieser Einbau ist weniger durch die Chemie dieser Elemente als durch ihre Ionenradien, die in einem gewissen Bereich schwanken dürfen, bestimmt. Somit kann man den Ursprung und Wert der negativen Überschußladung, die einen großen Einfluß auf die Eigenschaften der Tonminerale hat, nicht genau zu bestimmten Strukturelementen zuordnen. Eine genaue Beschreibung der Zusammensetzung und des Aufbaus dieser Tonminerale ist nur durch das Vermessen von Einkristallen möglich. Dies ist an verschiedenen Glimmern, z. B. dem Taeniolit (TORAYA et al., 1977) gelungen, konnte bisher aber noch an keinen Smectiten durchgeführt werden. In der vorliegenden Arbeit berichten wir über die Synthese und Einkristallstrukturbestimmung von Fluorohectorit.

Grim (1968) gibt einen Überblick über den Beginn der Tonmineralsynthesen.