

Anhang B6: Sorption von As(V) an oxisch inkubiertem Torf und die Auswirkung der Zugabe von Fe sowie Natriumcyanid und Natriumazid

Ziel

Ziel war es, das Sorptionsverhalten von As(V) unter oxischen Bedingungen an vier verschiedenen Torfproben zu ermitteln. Außerdem sollte überprüft werden in wiefern die Zugabe von FeCl_3 , mit Fe als potentiellen Brückenbildner von As an die organische Substanz, oder von Natriumazid und Natriumcyanid, welche die mikrobielle Aktivität hemmen, die Sorption von As beeinflussen.

Methode

Es wurden je eine Probe aus dem Niedermoor Schlöppnerbrunnen (SB1), Niedermoor Greifenbachstauweiher (GB2), Hochmoor Schlöppnerbrunnen (HS4) und dem Hochmoor Store mosse (SM1) untersucht.

Nach der Homogenisierung der Proben durch Verkneten in einer Plastiktüte wurden jeweils neun Parallelproben feldfeucht in säuregespülte 250 ml Afnor-Glasflaschen eingewogen. Die Einwaage entsprach einem Torf-Trockengewicht von 4 g (Tabelle Anhang B6-1). Außerdem wurde für jede Behandlung ein Blindwert mitgeführt.

Auf die Torfproben wurden 50 ml verdünnte Salzlösung ($0,04 \text{ mM Ca}^{2+}$, $0,04 \text{ mM Mg}^{2+}$, $0,04 \text{ mM Na}^+$, $0,15 \text{ mM K}^+$, $0,10 \text{ mM NH}_4^+$, $0,07 \text{ mM SO}_4^{2-}$, $0,09 \text{ mM NO}_3^-$, $0,2 \text{ mM Cl}^-$) gegeben. Anschließend wurden die Proben für zwei Wochen in der 15°C -Kammer vorinkubiert.

Alle Proben wurden anschließend schrittweise mit As(V) versetzt, wobei je drei der neun Parallelproben einer bestimmten Behandlung unterliefen (Tabelle B6 1).

Zu den Proben der Behandlung „As-CA“ wurde 19 h vor der ersten Probenahme 150 ml einer Lösung mit Natriumazid und Natriumcyanid (siehe Tabelle B6 1) mit einem pH-Wert von 4,2 gegeben, so dass der Gesamtgehalt in der Lösungsphase 1% betrug.

Zu den Proben mit der Behandlung „As“ wurde die gleiche Menge Regenwasser gegeben.

Die Zugabe der Fe-Lösung zu den Behandlungen „As-Fe“ erfolgte gestaffelt, um ein Ausfällen des Fe zu verhindern. Es wurden im Abstand von etwa 1 h zweimal 30 ml einer $0,2 \text{ mmol Fe}$ -Lösung aus FeCl_3 zugegeben. Nach 14 h erfolgte eine weitere Zugabe von 20 ml $0,2 \text{ mmol Fe}$ -Lösung und die Proben wurden weiterhin mit 70 ml verdünnter Salzlösung versetzt. Alle Proben enthielten zum Schluss 200 ml Lösung.

19 h nach der Zugabe der Lösung aus Natriumazid und Natriumcyanid wurde aus den ersten Proben 30 ml Lösung entnommen. Die Probenahme geschah mittels Spritzen mit Kanülen. Anschließend erfolgte die erste Zugabe von 30 ml As(V)-Lösung.

Tabelle B6 1: Übersicht über die drei verschiedenen Behandlungen der Torfproben zur Ermittlung der Sorption von Arsen und weiteren Einflussfaktoren.

Name der Behandlung	Behandlung	Anmerkungen
As	Während des Versuches wurde zu den Proben über fünf Schritte eine As-Menge von 5 mg/g zugesetzt.	Letzte max As-Konz.: 200 µg/g → es schien nicht vollständig sorbiert entspricht auch in etwa der zehnfachen Konzentration bei maximaler As-Zugabe.
As-Fe	Entsprechend der des mittleren C Gehaltes aller Proben wurde Fe in einem Verhältnis Fe:C von 1:10000 $\hat{=}$ 0,6 mg Fe pro 1 g C zugegeben → 0,2 mmol/l Fe(III) als FeCl ₃ Die As-Zugabe erfolgte wie bei der Behandlung „As“.	Durch die Zugabe von Fe ³⁺ in ionarer Form (FeCl ₃) soll der Einfluss von Kationenbrücken auf die Ad/Desorption von As(V) untersucht werden. Das Lösungsprodukt von FeCl ₃ (Fe(OH) ₃ und HCl) reagiert sehr sauer und bei höheren Konzentrationen kann es zur Ausfällung von Eisenhydroxid kommen. Deshalb können nur geringe Lösungskonzentrationen verwendet werden.
As-CA	Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid mit Endkonzentration von je 1 g/100 ml ($\hat{=}$ 1%) in der Lösung. Die mikrobielle Umwandlung der As-Spezies soll unterbunden werden. Die As-Zugabe erfolgte wie bei der Behandlung „As“.	Hemmung der Atmungskette mittels Cyanid und Azid (keine Sterilisation). Keine signifikante Störung der Bodenstruktur da Azid-Konzentration <10% (Alef & Nannipieri 1995). Möglicherweise geringer Anstieg des Boden-pH, begründet in der Bodenpufferungsfunktion (Trevors 1996).

Die As(V)-Lösung wurde aus einer Arsen-Standardlösung (Merck, rückführbar auf SRM von NIST H₃AsO₄ in HNO₃ 0,5 mol/l 1000mg/l As) hergestellt. Alle zugegebenen Lösungen wurden mittels 1M KOH-Lösung auf pH-Werte zwischen 4,1 und 4,6 titriert (Tabelle B6 2). Die Proben wurden anschließend einmal aufgeschüttelt und für 23 h in eine 15°C-Kammer gestellt. Es erfolgen vier weitere As-Zugaben steigender Konzentrationen im Abstand von je 23 h, so dass insgesamt sechs As-Konzentrationsstufen untersucht wurden (Tabelle B6 2). Nach der sechsten Probenahme erfolgte keine erneute Zugabe einer Lösung, aber zwei Tage später eine erneute Probenahme, diesmal von 70 ml, so dass 100 ml Lösung in den Proben verblieben.

Tabelle B6 2: Konzentrationsstufen der As-Zugabe für die Sorptionsversuche

Sorptionsstufe	angestrebte As-Konz. in der Probe [mg/l]*	As:Torf-Verhältnis [mg/g]	pH-Wert der Zugabelösung
1	0		
2	1	0.05	4,57
3	5	0.25	4,14
4	10	0.50	4,3
5	50	2.50	4.3-4.4
6	100	5.00	4,31

* die Endkonzentration in den verschiedenen Proben variiert, da bei der Probennahme verschiedene As-Mengen entnommen werden) und pH-Werte der As-Zugabelösungen.

Anschließend erfolgte an der verbliebenen festen Substanz der Desorptionsversuch mit der Zugabe von 100 ml verdünnter Salzlösung (siehe oben). Die Verwendung von destilliertem Wasser wurde unterlassen, um starke pH-Schwankungen sowie eine mögliche Dispergierung der organischen Substanz auszuschließen. Das Boden/Lösungsverhältnis beträgt auch hier $\geq 1:50$. Nach der Zugabe der Salzlösung wurden die Proben per Hand aufgeschüttelt und für 23 h bei 15°C stehen gelassen. Anschließend wurden pro Probe 100 ml Lösung entnommen und wiederum 100 ml verdünnter Salzlösung zugegeben. Die Desorption erfolgte in acht Schritten.

In allen entnommenen Lösungen des Sorptions- bzw. Desorptionsversuches wurden die pH-Werte gemessen.

Eine Teilprobe wurde mittels Unterdruck durch PP-Membranfilter 0,45 µm (VWR, GH-Polypro Ø 50 mm) gefiltert. Die Filter wurden zuvor konditioniert, indem sie mit 2 ml 6,5%iger HNO₃ sowie mindestens 5 ml deionisiertem Wasser und mit 2 ml Probe gespült wurden. Anschließend wurden je 15 ml Probe mit 50 µl 65%iger HNO₃ angesäuert. In diesen Proben wurden die Gesamtgehalte von As und Fe mittels ICP-OES und, wenn nötig, mittels ICP-MS durch die Chemische Analytik des BayCEER gemessen. Nach der letzten Probenahme von je 100 ml wurden die Proben gefriergetrocknet.

Ergebnisse

In allen Proben wurden während des Sorptionsversuches (6 d) 2-18 mg von 20 mg zugegebenen As sorbiert (Tabelle B6 3). Trotzdem wurde keine Sättigung erreicht. Das zeigte sich u.a. darin, dass die As-Lösungskonzentrationen in den zwei Tagen Standzeit zwischen Sorptions- und Desorptionsversuch weiter sanken (Tabelle Anhang B6-2). Auch die Sorptionskurven nähern sich nach der höchsten As-Zugabe keinem Grenzwert an (Abbildung B6 1). Die Sorptionskurven aller Proben zeigten nach der Zugabe der ersten As-Lösung einen stetig ansteigenden Verlauf, d.h. es wurde seit der ersten As-Zugabe As sorbiert.

Die Desorptionskurve der Probe SB1 zeigt einen untypischen Zickzackverlauf (Abbildung B6 1). Dieser ergibt sich daraus, dass in den ersten Desorptionsschritten wenig As desorbiert wurde, die desorbierte Menge dann anstieg und bei den letzten beiden Desorptionsschritten wieder abnahm. Die Desorptionskurven der anderen drei Proben zeigten einen gleichmäßigeren Verlauf.

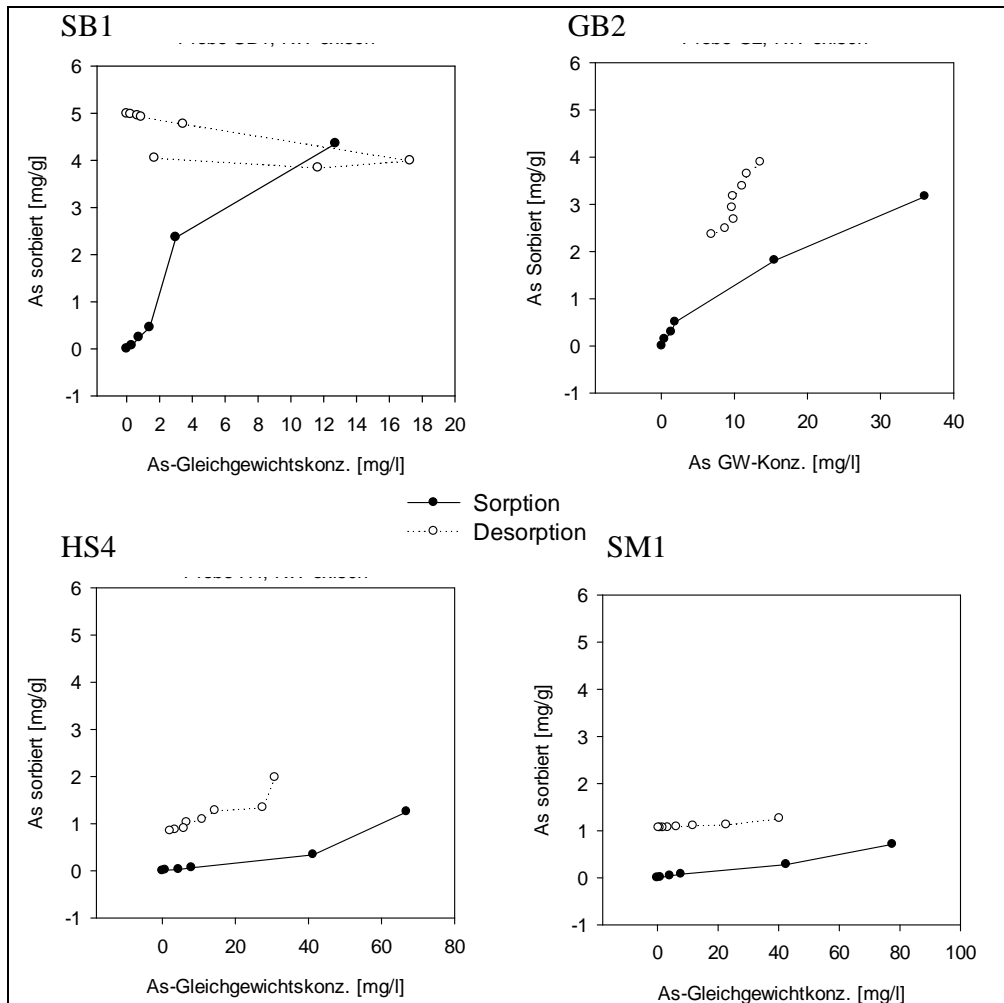


Abbildung B6 1: Sorptions- und Desorptionskurven von As(V) vier verschiedener Torfproben unter oxidischen Bedingungen.

Die As(V)-Sorption nach der Zugabe von Fe^{3+} verhält sich sehr ähnlich wie die bei der reinen As-Zugabe (Abbildung B6 2), allerdings wurde nur in den Niedermoorproben direkt nach der ersten As-Zugabe As(V) sorbiert. Die Sorption von As(V) war in diesen Proben außerdem nach der Zugabe der ersten drei As-Konzentrationsstufen geringfügig schlechter als in den Proben ohne Fe-Zugabe. Nach Zugabe der 5. (in Probe GB2) bzw. 6. As-Konzentrationsstufe (in Probe SB1) wurde allerdings in den Niedermoorproben mit Fe-Zugabe eine geringfügig höhere As-Menge sorbiert.

In den Hochmoorproben begann die Sorption in den Proben mit Fe-Zusatz erst nach Zugabe der zweiten (Probe HS4) bzw. dritten (Probe SM1) As-Konzentrationsstufe. Auch in Probe SM1 lagen die sorbierten As-Mengen nach Zugabe der letzten As-Konzentrationsstufe geringfügig über denen der Proben ohne Fe-Zugabe und die Sorptionskurven zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf.

In Probe HS4 unterscheidet sich der Sorptionsverlauf: Nach einer größeren As-Sorption in der Probe mit Fe-Zugabe nach Zugabe der 5ten As-Konzentrationsstufe, wurde nach Zugabe der 6ten As-Konzentrationsstufe weniger As sorbiert.

Das Desorptionsverhalten in den Probe SB1, GB2 und SM1 ist in den Proben mit Fe-Zugabe fast identisch mit den Proben, die nur mit As versetzt wurden. Es verblieben nach acht Desorptionsschritten auch gleiche As-Mengen in den Proben. In der Probe HS4 wurde in allen Desorptionsschritten etwas weniger As freigesetzt, so dass am Ende des Versuches mehr As in den Proben verblieb.

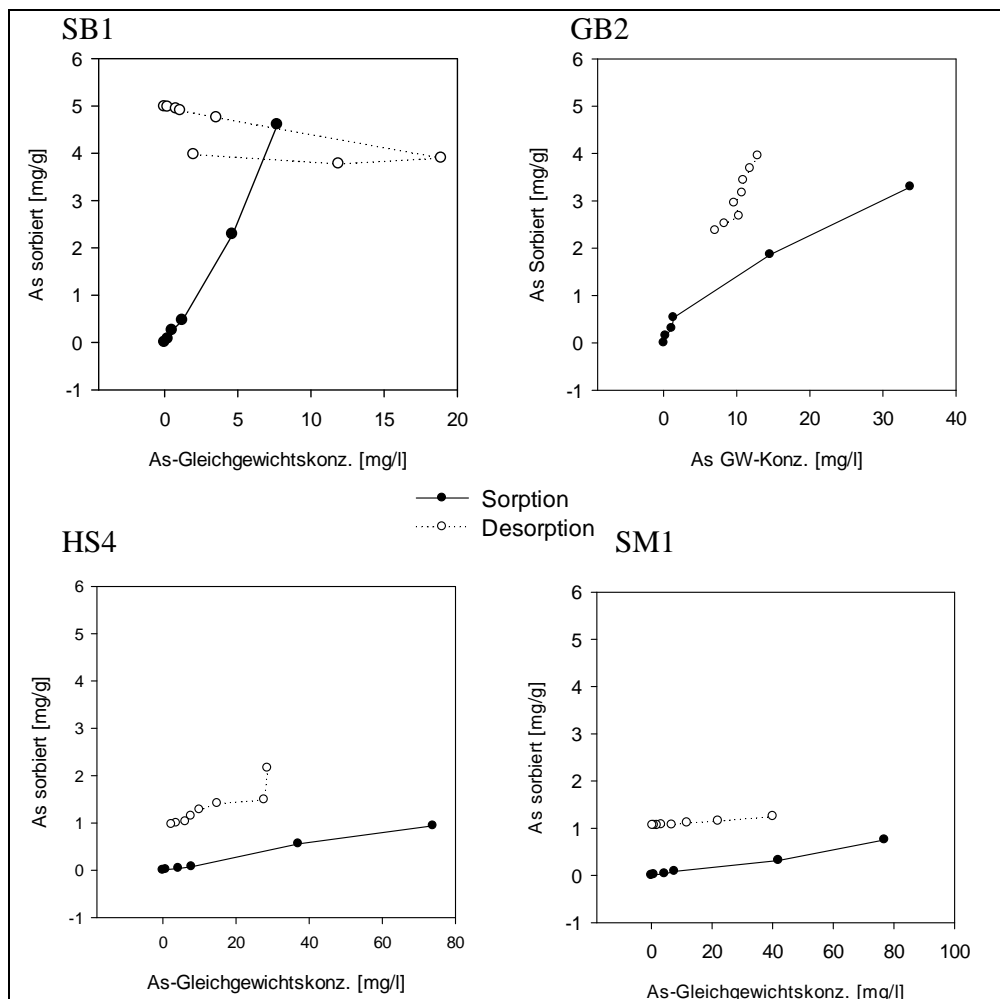


Abbildung B6 2: Sorptions- und Desorptionskurven von As(V) vier verschiedener Torfproben unter oxidischen Bedingungen bei Zugabe von 0,2 mmol/l Fe(III) als FeCl_3 .

Die Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid führte in allen vier Proben zu einer schlechteren Sorption von As(V) als bei den anderen Probenbehandlungen. Besonders auffällig war dies bei den Niedermoorproben (Abbildung B6 3).

Die Kurven der Proben SB1, GB2 und SB1 verlaufen flacher als bei den Proben ohne Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid, aber es wurde seit der ersten As-Zugabe As(V) sorbiert. Die Probe HS4

zeigte über den gesamten Versuchverlauf eine mäßige bis fehlende Sorption von As(V) und sorbierte erst nach Zugabe der letzten As-Konzentrationsstufe signifikante Mengen As.

Auch die desorbierten As-Mengen war in diesen Proben wesentlich größer als in den anderen Proben. Auch verlief die Desorption in Probe SB1 wesentlich gleichmäßiger als in den Proben ohne Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid (Abbildung B6 3).

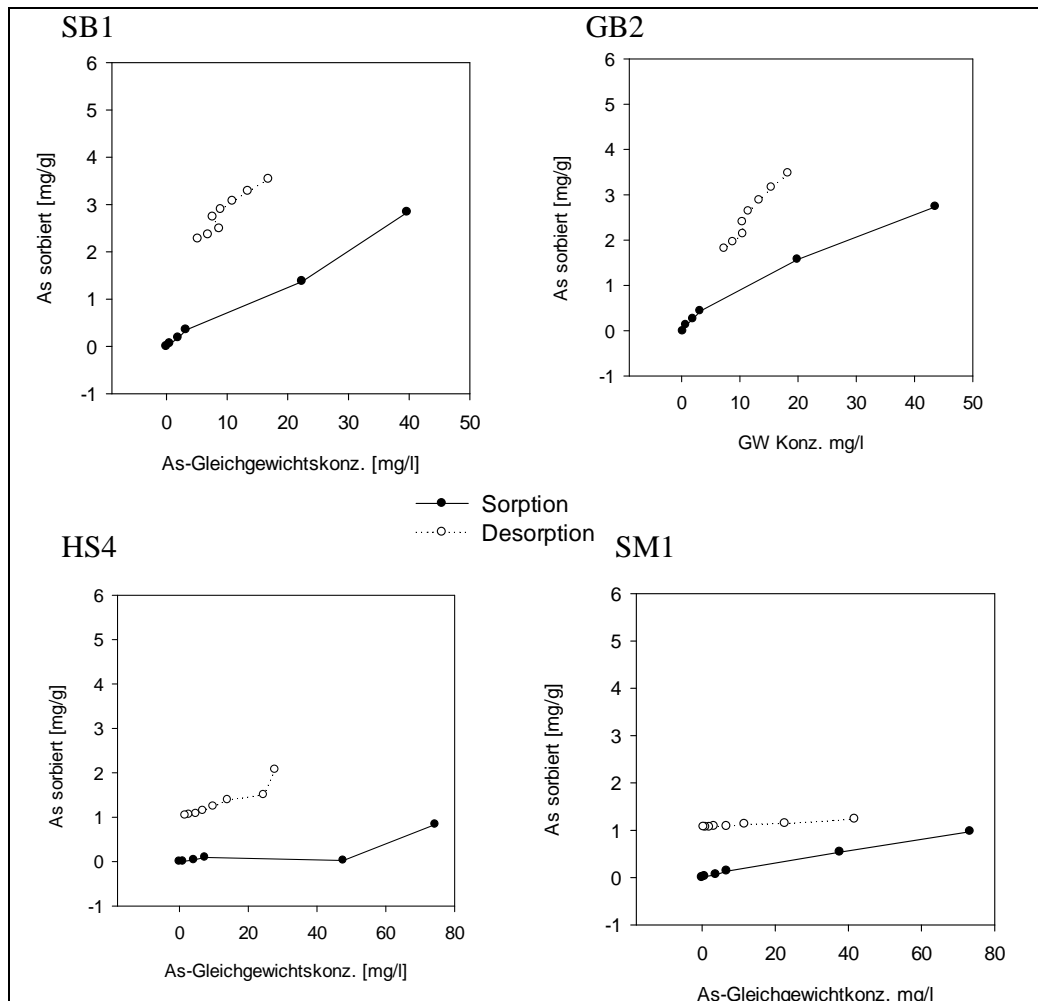


Abbildung B6 3: Sorptions- und Desorptionskurven von As(V) vier verschiedener Torfproben unter oxischen Bedingungen bei Zugabe von je 1% Natriumazid und Natriumcyanid.

Insgesamt verblieben nach den acht Desorptionsschritten 0,7-16 mg As in den Proben. Die Hochmoorproben sorbieren dabei weniger As als die minerotrophen Proben.

Die Fe-Zugabe (Fe:C Verhältnis von 1:10000) führte nicht zu einer signifikante Verbesserung der Sorption. Nur im Falle der Probe H4 führte die Zugabe des Fe zu einem erhöhten Rückhaltevermögen von As bei der Desorption. Im Blindwert „As-Fe“ fiel rötlicher Niederschlag aus, der bis zum Ende des Versuches zu sehen war.

Die Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid bewirkte eine deutliche Abnahme der As-Sorption. Die Proben GB2 und SB1, die mehr als 5 mg/kg Fe enthielten, zeigten nach der Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid eine deutliche Rotfärbung der Lösung.

Tabelle B6 3: Sorbiertes As nach dem Sorptionsversuch mit einer As-Zugabe von 20 mg und nach der Desorption.

Probe	Behandlung „As“	sorbiertes As [mg]	
		Behandlung „As-Fe“	Behandlung „As-CA“
SB1	17,5/ 15,9	18,5/ 15,7	10,0/ 6,5
SM1	3,0/ 2,1	3,2/ 2,1	2,6/ 0,8
HS4	5,2/ 1,5	3,9/ 1,8	2,1 / 0,7
GB2	12,4 / 8,1	12,9 / 8,2	9,3 / 4,2

Trotz der Einstellung der As-Zugabelösungen auf einen pH-Wert im Bereich der verschiedenen Proben, mussten starke pH-Schwankungen in den Lösungsproben über den Versuchsverlauf hinweg verzeichnet werden (Abbildung B6 4 und Anhang B6-6).

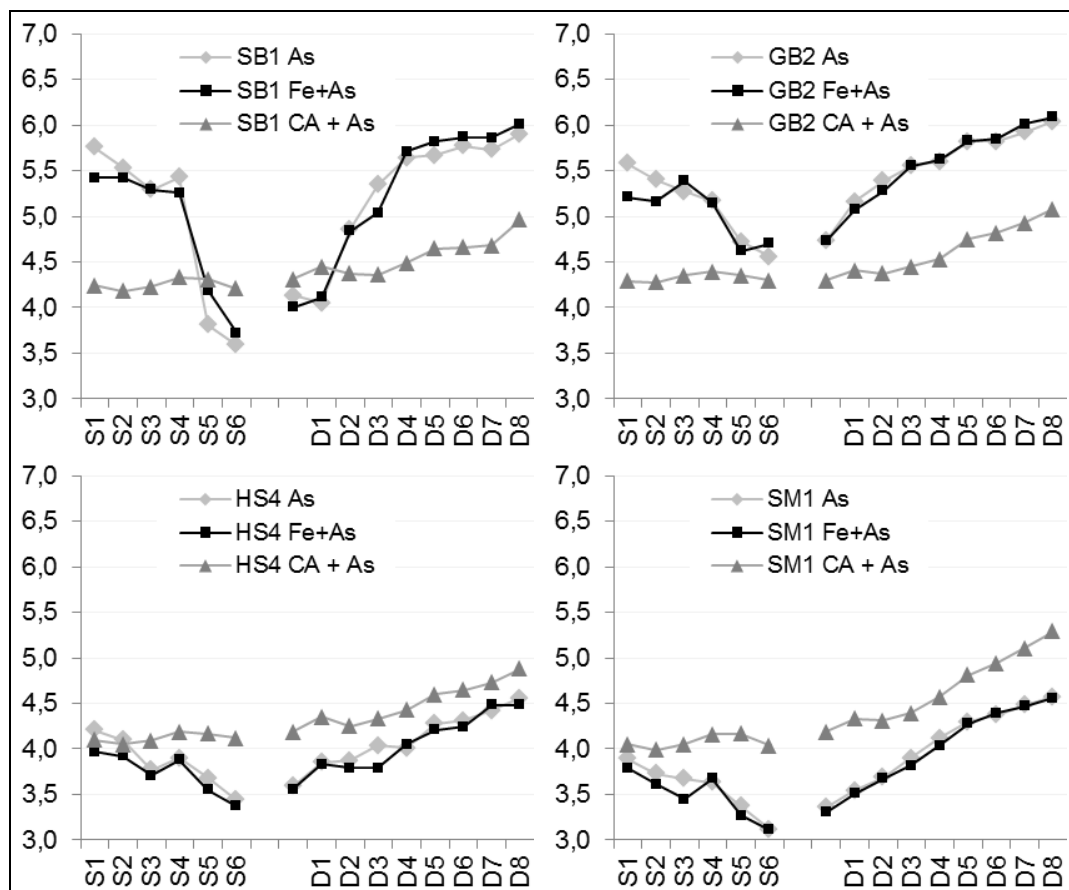


Abbildung B6 4: pH-Werte während der Sorptions- und Desorptionsversuche mit As(V) an vier verschiedenen Torfproben bei drei unterschiedlichen Versuchsvarianten (As: Zugabe von As in 7 Konzentrationsstufen, Fe: zusätzliche Zugabe von 0,2 mmol/l Fe(III) als FeCl_3 , CA: zusätzliche Zugabe von 1% Natriumazid und Natriumcyanid) unter oxischen Bedingungen.

Die pH-Werte in den Proben mit Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid schwanken dabei am geringsten (Abbildung B6 4), allerdings wiesen die Niedermoorproben mit dieser Behandlung über den ganzen Versuch hinweg die niedrigsten pH-Werte auf. Die größten pH-Schwankung im Versuchsverlauf traten in Probe SB1 (Abbildung B6 4), gefolgt von Probe GB2 bei den Behandlungen „As“ und „As-Fe“, auf. Das sind die Proben mit den höchsten Fe-Gehalten.

Diskussion

Im vorliegenden Versuch zeigte sich, dass die Niedermoorproben As(V) unter oxischen Bedingungen besser bzw. schneller sorbierten als die Hochmoorproben. Das ist möglicherweise auf die höheren Mineralkonzentrationen in diesen Proben zurückzuführen, aber auch eine andere Zusammensetzung der organischen Substanz könnte ursächlich sein. In keiner der Proben wurde zum Ende des Versuches eine As-Sättigung erreicht. Das bedeutet, dass As noch über einen längeren Zeitpunkt weiter sorbiert werden könnte. Möglicherweise würden sich dann auch die sorbierten As-Mengen in den Hochmoorproben an die der Niedermoorproben angleichen.

Durch die Zugabe von Eisen zu den Proben wurde der Beginn der As(V)-Sorption in den Hochmoorproben etwas verzögert. Bei Betrachtung des gesamten Sorptionsverlaufes hatte die Fe-Zugabe aber keinen signifikanten Einfluss. Eine deutliche Verbesserung der Sorption konnte also nicht festgestellt werden. Da in den Blindwerten die Ausfällung von Fe beobachtet wurde, ist es möglich, dass eine solche Ausfällung auch in den Proben stattfand und das zugegebene Fe daher keinen Einfluss auf das weitere Sorptionsverhalten von As(V) nahm.

Einen großen Einfluss auf die Sorption von As(V) hatte die Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid zu den Proben. Insbesondere das Cyanid beeinflusste die Bodenmatrix stark, indem es das in den Proben enthaltene Eisen komplexierte, welches an der Rotfärbung der Bodenlösungen zu erkennen war. Fe kann durch in Böden z.B. in Form von Hexacyanidoferrat ($\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ oder $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$) komplexiert werden (Meeussen et al. 1992).

Die Proben mit der Behandlung „As-CA“ sorbierten signifikant weniger As als sie Proben der anderen beiden Behandlungen. Die Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid führte zu einer Absenkung der pH-Werte in den Niedermoorproben, was eine schlechtere Sorption von As(V) begünstigt haben kann. Weiterhin zeigte sich dieser Versuchsansatz als problematisch, da die hohen Na-Konzentrationen in den Proben mit Zugabe von Natriumazid und Natriumcyanid zu Problemen bei der Messung mittels ICP-OES führten.

In Summe ist die Verwendung von Natriumazid und Natriumcyanid zur Hemmung der Mikroorganismenaktivität nicht sinnvoll, da die Bodenparameter zu stark beeinflusst werden und so nicht klar definiert werden kann, welche Veränderungen der As-Sorption aufgrund der chemischen Substanzen und welche auf Grund der gehemmten Mikroorganismen vorliegen.

Ein großes Problem im beschriebenen Versuch stellten die starken pH-Schwankungen im Versuchsverlauf dar. Große pH-Veränderungen führen zu anderen Sorptionsbedingungen von As(V) (Pierce & Moore 1982; Smith et al. 1999; Goldberg 2002). Dadurch können keine Sorptionsisothermen ermittelt werden, da diese einen stetigen pH-Wert voraussetzen. Bei Probe SB1 zeigt sich die Problematik deutlich im Verlauf der Desorptionskurve, die auf Grund der starken pH-Schwankungen sehr ungleichmäßig verlief.

Ursächlich für die starken pH-Schwankungen sind möglicherweise veränderte Salzkonzentrationen in der Lösung, zum einen bei immer höheren Zugaben von As-Lösungen im Sorptionsversuch und zum anderen durch die immer stärkere Verdünnung der Bodenlösung bei der Desorption.

Fazit

Die Sorption von Arsen erreichte nach 24 h nicht den Endpunkt. Daher ist zu überlegen, in weiteren Versuchen mit geringeren As-Konzentrationen zu Arbeiten.

Die Zugabe von Natriumcyanid und Natriumazid zur Hemmung der Mikroorganismenaktivität war für diesen Versuch nicht geeignet, da diese Agenzien die Proben so stark veränderten, dass ein Vergleich der Sorption mit den anderen Bodenproben nicht möglich war.

Die Zugabe von Fe zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die As-Sorption. Es ist allerdings nicht klar, ob diese Erscheinung auf eine Fe-Ausfällung zurückzuführen ist. Dies müsste in weiteren Versuchen geprüft werden. Sinnvoll wäre es, hierzu beispielsweise im Sorptionsversuch eine Probe mitzuführen, welche nur Bodenlösung, aber keinen Torf mehr enthält. Damit könnte man auch eventuelle Ausfällungen von As besser zu prüfen, um diese nicht mit einer Sorption von As zu verwechseln.

Die wohl wichtigste Erkenntnis aus diesem Versuch ist, dass die pH-Werte nicht allein durch eine Regulierung der pH-Werte in den zugegebenen As-Zugabelösungen konstant gehalten werden können. Die Ursache für die schwankenden pH-Werte ist vermutlich in der veränderten Salzkonzentration der Lösungen zu suchen. Dies soll im folgenden Vorversuch (Anhang B7) überprüft werden. Auch bezüglich der hohen Salzzufuhr wäre es sinnvoll, bei weiteren Versuchen die zugegebenen As-Mengen herabzusetzen.

Literatur

- Alef K. & Nannipieri P. 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press.
- Goldberg, S. 2002. Competitive Adsorption of Arsenate and Arsenite on Oxides and Clay Minerals. Soil Sci. Soc. Am. J. 66:413-421.
- Meeussen, J.C.L., M.G. Keizer & F.A.M. De Haan. 1992. Chemical stability and decomposition rate of iron cyanide complexes in soil solutions. Environmental Science & Technology 26:511-516.
- Pierce, M.L. & C.B. Moore. 1982. Adsorption of arsenite and arsenate on amorphous iron hydroxide. Water Research 16:1247-1253.

- Smith, E., R. Naidu & A.M. Alston. 1999. Chemistry of Arsenic in Soils: I. Sorption of Arsenate and Arsenite by Four Australian Soils. J. Environ. Qual. 28:1719-1726.
- Trevors, J. T. 1996. Sterilization and inhibition of microbial activity in soil. Journal of Microbiological Methods, 26(1): 53-59.

Anhang zu B6

Anhang B6-1: Einwaagen der vier Torfproben für den Sorptionsversuch.

Teil- proben	Probe	SB1		GB2		HS4		SM1	
		Einwaage [g]	Trocken- gewicht [g]	Einwaage [g]	Trocken- gewicht [g]	Einwaage [g]	Trocken- gewicht [g]	Einwaage [g]	Trocken- gewicht [g]
1	As	58,88	4,12	41,72	4,17	54,47	3,81	30,51	3,97
2	As	58,82	4,12	41,78	4,18	54,41	3,81	30,50	3,97
3	As	58,86	4,12	41,73	4,17	54,44	3,81	30,50	3,97
4	Fe+As	58,87	4,12	41,79	4,18	54,43	3,81	30,59	3,98
5	Fe+As	58,81	4,12	41,75	4,18	54,48	3,81	30,53	3,97
6	Fe+As	58,88	4,12	41,72	4,17	54,46	3,81	30,57	3,97
7	CA + As	58,82	4,12	41,73	4,17	54,46	3,81	30,50	3,97
8	CA + As	58,85	4,12	41,71	4,17	54,41	3,81	30,52	3,97
9	CA + As	58,78	4,11	41,79	4,18	54,42	3,81	30,54	3,97

Anhang B6-2: As-Gleichgewichtskonzentrationen während des Sorptionsversuches mit Zugabe verschiedener As-Konzentrationsstufen (< = kleiner Nachweisgrenze von 1 µg/l).

Teilprobe	Behandlung	Datum	Sorptionsschritt	SB1	GB3	HS4	SM1	Blindwert
Gleichgewichtskonz. As [mg/l]								
1	As	03.02.2010	S1	0,01	0,05	0,00	0,00	<
2	As	03.02.2010	S1	0,01	0,09	0,00	0,00	
3	As	03.02.2010	S1	0,02	0,10	0,00	0,00	
4	Fe+As	03.02.2010	S1	0,01	0,04	0,00	0,00	<
5	Fe+As	03.02.2010	S1	0,01	0,03	0,00	0,00	
6	Fe+As	03.02.2010	S1	0,01	0,15	0,00	0,00	
7	CA + As	03.02.2010	S1	0,04	0,17	0,01	<	<
8	CA + As	03.02.2010	S1	0,03	0,25	<	0,02	
9	CA + As	03.02.2010	S1	0,01	0,28	0,00	<	
1	As	04.02.2010	S2	0,33	0,58	0,86	0,99	1,01
2	As	04.02.2010	S2	0,30	0,50	0,86	0,96	
3	As	04.02.2010	S2	0,33	0,31	0,80	0,91	
4	Fe+As	04.02.2010	S2	0,22	0,32	0,85	0,82	0,64
5	Fe+As	04.02.2010	S2	0,25	0,23	0,84	0,84	
6	Fe+As	04.02.2010	S2	0,25	0,35	0,79	0,84	
7	CA + As	04.02.2010	S2	0,52	0,70	0,77	0,71	0,81
8	CA + As	04.02.2010	S2	0,59	0,83	1,06	0,73	
9	CA + As	04.02.2010	S2	0,54	0,74	1,45	0,78	
1	As	05.02.2010	S3	0,72	1,66	4,78	4,19	4,65

2	As	05.02.2010	S3	0,67	1,10	4,05	4,19	
3	As	05.02.2010	S3	0,88	1,36	4,61	4,20	
4	Fe+As	05.02.2010	S3	0,45	1,16	4,01	4,07	4,20
5	Fe+As	05.02.2010	S3	0,60	0,90	4,01	4,32	
6	Fe+As	05.02.2010	S3	0,51	1,28	4,75	4,61	
7	CA + As	05.02.2010	S3	1,80	1,82	3,95	3,76	3,79
8	CA + As	05.02.2010	S3	2,19	1,94	3,74	3,54	
9	CA + As	05.02.2010	S3	1,88	2,12	4,99	4,12	
1	As	06.02.2010	S4	0,97	2,12	7,09	7,78	8,38
2	As	06.02.2010	S4	1,56	1,67	7,83	7,81	
3	As	06.02.2010	S4	1,68	1,93	9,17	7,91	
4	Fe+As	06.02.2010	S4	1,05	1,21	7,50	7,50	8,05
5	Fe+As	06.02.2010	S4	1,25	1,09	8,23	7,46	
6	Fe+As	06.02.2010	S4	1,37	1,78	7,90	7,92	
7	CA + As	06.02.2010	S4	3,12	3,22	7,21	6,82	7,08
8	CA + As	06.02.2010	S4	3,25	3,01	7,05	6,79	
9	CA + As	06.02.2010	S4	3,41	3,41	8,06	6,62	
1	As	07.02.2010	S5	1,02	16,80	41,80	43,80	44,50
2	As	07.02.2010	S5	3,92	14,90	42,00	41,80	
3	As	07.02.2010	S5	4,07	14,80	40,10	42,10	
4	Fe+As	07.02.2010	S5	3,27	15,00	36,60	41,70	44,60
5	Fe+As	07.02.2010	S5	3,40	14,60	36,60	42,10	
6	Fe+As	07.02.2010	S5	7,27	14,20	37,90	41,90	
7	CA + As	07.02.2010	S5	20,90	18,50	48,70	37,30	39,40
8	CA + As	07.02.2010	S5	23,10	22,60	47,70	36,90	
9	CA + As	07.02.2010	S5	23,10	18,70	46,60	38,90	
1	As	08.02.2010	S6	12,60	38,20	61,50	77,80	85,00
2	As	08.02.2010	S6	13,50	36,40	68,70	75,20	
3	As	08.02.2010	S6	12,10	33,60	70,50	79,70	
4	Fe+As	08.02.2010	S6	11,60	31,70	73,80	78,10	85,70
5	Fe+As	08.02.2010	S6	7,62	33,90	72,00	76,80	
6	Fe+As	08.02.2010	S6	3,88	35,70	75,80	75,80	
7	CA + As	08.02.2010	S6	41,30	43,90	71,70	72,40	80,10
8	CA + As	08.02.2010	S6	40,70	46,70	70,00	73,80	
9	CA + As	08.02.2010	S6	37,10	40,30	81,30	73,80	
1	As	10.02.2010	S7	0,49	23,60	65,30	73,20	84,70
2	As	10.02.2010	S7	0,19	22,20	66,40	76,20	
3	As	10.02.2010	S7	0,03	22,70	66,90	76,30	
4	Fe+As	10.02.2010	S7	0,04	22,10	68,60	76,70	84,30
5	Fe+As	10.02.2010	S7	0,05	22,30	68,00	76,70	
6	Fe+As	10.02.2010	S7	0,07	21,60	66,20	76,70	
7	CA + As	10.02.2010	S7	25,80	30,40	71,10	73,50	78,90
8	CA + As	10.02.2010	S7	25,60	31,90	64,20	77,80	
9	CA + As	10.02.2010	S7	25,30	28,40	66,40	74,50	

Anhang B6-3: As-Gleichgewichtskonzentrationen während des Desorptionsversuches.

Teilprobe	Behandlung	Datum	Desorptionsschritt	SB1	GB3	HS4	SM1	Blindwert
Gleichgewichtskonzentration As [mg/l]								
1	As	11.02.2010	D1	< 1µg/l	13,9	30,8	40,4	42,8
2	As	11.02.2010	D1	0,0132	13,4	29,1	40	
3	As	11.02.2010	D1	0,0107	13,4	32,6	40,7	
4	Fe+As	11.02.2010	D1	0,0078	12,7	27	38,6	41,7
5	Fe+As	11.02.2010	D1	0,00655	12,7	31,3	41,4	
6	Fe+As	11.02.2010	D1	0,00914	13,4	27,6	40,4	
7	CA + As	11.02.2010	D1	16,1	19	27,1	41,3	41,8
8	CA + As	11.02.2010	D1	16,6	18,5	28,2	41,7	
9	CA + As	11.02.2010	D1	17,9	17,4	28,3	42,3	
1	As	12.02.2010	D2	0,299	12,3	28,4	22,5	20,9
2	As	12.02.2010	D2	0,195	11,5	28,3	23,4	
3	As	12.02.2010	D2	0,242	11,4	25,8	22,4	
4	Fe+As	12.02.2010	D2	0,275	11,8	28	23,5	20
5	Fe+As	12.02.2010	D2	0,138	11,8	27	21,7	
6	Fe+As	12.02.2010	D2	0,235	12	28,2	20,9	
7	CA + As	12.02.2010	D2	13	15,1	26,2	22,7	20,4
8	CA + As	12.02.2010	D2	14,1	15,6	24,9	22,9	
9	CA + As	12.02.2010	D2	13,4	15,7	22,5	22,6	
1	As	13.02.2010	D3	0,646	10,6	14,5	11,5	9,73
2	As	13.02.2010	D3	0,679	11,4	15,9	12,1	
3	As	13.02.2010	D3	0,68	11,3	12,9	11,8	
4	Fe+As	13.02.2010	D3	0,676	11,1	14,7	12,4	9,2
5	Fe+As	13.02.2010	D3	0,666	10,5	15,7	11,5	
6	Fe+As	13.02.2010	D3	1,07	11,2	14,3	11,5	
7	CA + As	13.02.2010	D3	11	13,6	14,6	11,2	9,56
8	CA + As	13.02.2010	D3	11,2	13,8	12,6	12	
9	CA + As	13.02.2010	D3	10,6	12,7	15	11,8	
1	As	14.02.2010	D4	0,822	9,35	11	6,19	4,85
2	As	14.02.2010	D4	0,892	9,73	11,2	6,76	
3	As	14.02.2010	D4	0,97	10,4	10,7	6,22	
4	Fe+As	14.02.2010	D4	0,716	10,9	10,1	6,77	4,63
5	Fe+As	14.02.2010	D4	1,03	10,6	9,21	6,51	
6	Fe+As	14.02.2010	D4	1,5	10,8	10,9	7,04	
7	CA + As	14.02.2010	D4	9,67	12,2	11,3	7,09	4,76
8	CA + As	14.02.2010	D4	8,35	12,1	9	6,57	
9	CA + As	14.02.2010	D4	8,95	10,2	9,37	6,66	
1	As	15.02.2010	D5	3,08	9,63	7,4	3,56	2,2
2	As	15.02.2010	D5	3,34	10	6,57	3,62	
3	As	15.02.2010	D5	3,94	9,48	6,15	3,21	

4	Fe+As	15.02.2010	D5	3,39	9,55	8,3	3,09	2,04
5	Fe+As	15.02.2010	D5	4,03	9,37	6,53	3,41	
6	Fe+As	15.02.2010	D5	3,24	10,1	8,45	3,42	
7	CA + As	15.02.2010	D5	7,63	9,89	6,97	3,75	2,09
8	CA + As	15.02.2010	D5	7,78	10,6	8	3,52	
9	CA + As	15.02.2010	D5	7,62	11	5,7	2,7	
1	As	16.02.2010	D6	15,9	9,81	6,07	1,92	1,04
2	As	16.02.2010	D6	16,7	10,1	5,24	1,94	
3	As	16.02.2010	D6	19,2	9,88	6,56	1,71	
4	Fe+As	16.02.2010	D6	16,7	10,4	6,54	1,74	0,988
5	Fe+As	16.02.2010	D6	19,9	10,7	6,06	1,72	
6	Fe+As	16.02.2010	D6	20,1	9,97	6,04	2,19	
7	CA + As	16.02.2010	D6	8,73	10,3	4,97	2	1,01
8	CA + As	16.02.2010	D6	8,73	10,2	5,36	2,07	
9	CA + As	16.02.2010	D6	8,86	11,1	4,37	2,07	
1	As	17.02.2010	D7	10,1	8,68	3,59	0,935	0,462
2	As	17.02.2010	D7	10,8	8,84	3,13	0,97	
3	As	17.02.2010	D7	14,1	8,74	3,77	0,812	
4	Fe+As	17.02.2010	D7	10,7	8,47	4,06	0,871	0,443
5	Fe+As	17.02.2010	D7	10,8	8,58	3,41	0,824	
6	Fe+As	17.02.2010	D7	14,2	8,03	3,6	1,03	
7	CA + As	17.02.2010	D7	6,49	8,76	2,71	1	0,446
8	CA + As	17.02.2010	D7	6,96	8,47	3,14	1,02	
9	CA + As	17.02.2010	D7	7,29	9,28	2,57	1,01	
1	RW	18.02.2010	D8	1,71	6,91	2,12	0,426	0,221
2	RW	18.02.2010	D8	1,64	6,99	1,96	0,494	
3	RW	18.02.2010	D8	1,77	6,82	2,36	0,402	
4	RW, Fe	18.02.2010	D8	1,74	7,27	2,47	0,409	0,206
5	RW, Fe	18.02.2010	D8	1,75	7,36	2,31	0,407	
6	RW, Fe	18.02.2010	D8	2,49	6,73	2,37	0,491	
7	RW, CA	18.02.2010	D8	5,08	6,97	1,86	0,462	0,229
8	RW, CA	18.02.2010	D8	5,1	7,52	1,86	0,492	
9	RW, CA	18.02.2010	D8	5,52	7,55	1,5	0,463	

Anhang B6-4: Fe-Gleichgewichtskonzentrationen während des As-Sorptionsversuches.

Teilprobe	Behandlung	Datum	Sorptionsschritt	SB1	GB3	HS4	SM1	Blindwert
Gleichgewichtskonzentration Fe [mg/l]								
1	As	03.02.2010	S1	2,85	0,08	0,06	0,05	0,01
2	As	03.02.2010	S1	2,23	0,90	0,05	0,01	
3	As	03.02.2010	S1	2,92	0,56	0,04	0,01	
4	Fe+As	03.02.2010	S1	1,73	0,23	0,68	0,10	0,14
5	Fe+As	03.02.2010	S1	1,83	0,17	0,68	0,07	
6	Fe+As	03.02.2010	S1	2,32	3,08	0,84	0,09	
7	CA + As	03.02.2010	S1	145,00	15,34	5,88	0,13	0,01
8	CA + As	03.02.2010	S1	129,00	15,20	4,25	0,15	
9	CA + As	03.02.2010	S1	153,00	15,02	3,83	0,12	
1	As	04.02.2010	S2	4,52	0,13	0,09	0,55	0,16
2	As	04.02.2010	S2	4,31	0,13	0,11	0,24	
3	As	04.02.2010	S2	5,79	0,16	0,11	0,01	
4	Fe+As	04.02.2010	S2	4,84	0,23	0,15	0,04	0,03
5	Fe+As	04.02.2010	S2	4,60	0,27	0,23	0,05	
6	Fe+As	04.02.2010	S2	4,79	0,28	0,17	0,03	
7	CA + As	04.02.2010	S2	151,00	24,51	5,20	0,15	0,06
8	CA + As	04.02.2010	S2	155,00	24,03	3,96	0,14	
9	CA + As	04.02.2010	S2	135,00	21,21	3,34	0,13	
1	As	05.02.2010	S3	3,73	0,14	0,18	0,57	0,14
2	As	05.02.2010	S3	4,05	0,17	0,18	0,25	
3	As	05.02.2010	S3	4,90	0,18	0,14	0,11	
4	Fe+As	05.02.2010	S3	3,40	0,32	0,18	0,03	0,02
5	Fe+As	05.02.2010	S3	5,26	0,26	0,20	0,03	
6	Fe+As	05.02.2010	S3	3,25	0,17	0,20	0,03	
7	CA + As	05.02.2010	S3	132,00	24,50	4,62	0,11	0,03
8	CA + As	05.02.2010	S3	125,00	23,20	4,79	0,10	
9	CA + As	05.02.2010	S3	142,00	24,50	3,63	0,11	
1	As	06.02.2010	S4	4,44	0,13	0,18	0,56	0,02
2	As	06.02.2010	S4	6,13	0,15	0,19	0,20	
3	As	06.02.2010	S4	7,19	0,12	0,16	0,02	
4	Fe+As	06.02.2010	S4	4,81	0,21	0,54	0,02	-
5	Fe+As	06.02.2010	S4	5,81	0,22	0,21	0,02	
6	Fe+As	06.02.2010	S4	5,92	0,33	0,23	0,02	
7	CA + As	06.02.2010	S4	118,00	18,80	3,75	0,07	0,03
8	CA + As	06.02.2010	S4	119,00	22,10	4,48	0,07	
9	CA + As	06.02.2010	S4	119,00	21,70	4,32	0,07	
1	As	07.02.2010	S5	0,65	0,14	0,65	0,38	0,03
2	As	07.02.2010	S5	0,80	0,19	0,55	-	
3	As	07.02.2010	S5	0,58	0,12	0,41	0,02	

4	Fe+As	07.02.2010	S5	0,65	1,12	0,39	0,08	0,04
5	Fe+As	07.02.2010	S5	0,63	0,12	0,37	0,02	
6	Fe+As	07.02.2010	S5	0,42	0,08	0,44	0,02	
7	CA + As	07.02.2010	S5	85,90	17,70	2,76	< 1 µg/l	0,04
8	CA + As	07.02.2010	S5	84,00	17,80	3,39	0,10	
9	CA + As	07.02.2010	S5	86,20	18,80	3,58	0,09	
1	As	08.02.2010	S6	1,40	0,06	1,13	0,29	0,03
2	As	08.02.2010	S6	0,57	0,06	0,68	0,12	
3	As	08.02.2010	S6	2,14	0,11	0,79	0,02	
4	Fe+As	08.02.2010	S6	1,24	0,07	0,92	0,03	0,04
5	Fe+As	08.02.2010	S6	2,13	0,06	0,97	0,03	
6	Fe+As	08.02.2010	S6	4,24	0,13	0,56	0,12	
7	CA + As	08.02.2010	S6	62,10	13,60	2,26	0,06	0,04
8	CA + As	08.02.2010	S6	69,30	14,70	2,64	0,05	
9	CA + As	08.02.2010	S6	70,60	15,70	2,77	0,04	
1	As	10.02.2010	S7	0,59	0,05	0,22	0,24	0,03
2	As	10.02.2010	S7	0,45	0,08	0,11	0,03	
3	As	10.02.2010	S7	0,86	0,04	0,15	0,02	
4	Fe+As	10.02.2010	S7	0,54	0,04	0,12	0,03	0,04
5	Fe+As	10.02.2010	S7	0,82	0,04	0,14	0,02	
6	Fe+As	10.02.2010	S7	3,31	0,04	0,13	0,02	
7	CA + As	10.02.2010	S7	61,60	10,20	1,57	0,05	0,04
8	CA + As	10.02.2010	S7	72,00	10,40	1,85	0,04	
9	CA + As	10.02.2010	S7	65,80	11,50	2,09	0,04	

Anhang B6-5: Fe-Gleichgewichtskonzentrationen während des Desorptionsversuches (< = kleiner Nachweisgrenze von 1µg/l).

Teilprobe	Behandlung	Datum	Desorptionsschritt	SB1	GB3	HS4	SM1	Blindwert
Gleichgewichtskonzentration Fe [mg/l]								
1	As	11.02.2010	D1	0,42	0,04	0,30	0,13	0,04
2	As	11.02.2010	D1	0,32	0,04	0,23	0,02	
3	As	11.02.2010	D1	0,51	0,04	0,20	0,01	
4	Fe+As	11.02.2010	D1	0,53	0,03	0,31	0,01	0,02
5	Fe+As	11.02.2010	D1	1,18	0,03	0,29	0,01	
6	Fe+As	11.02.2010	D1	1,06	0,05	0,17	0,01	
7	CA + As	11.02.2010	D1	29,40	4,69	0,76	0,12	0,06
8	CA + As	11.02.2010	D1	31,20	4,58	0,85	0,08	
9	CA + As	11.02.2010	D1	31,00	4,67	1,18	0,06	
1	As	12.02.2010	D2	0,23	0,04	0,17	0,01	0,01
2	As	12.02.2010	D2	0,23	0,03	0,06	0,00	
3	As	12.02.2010	D2	0,47	0,03	0,03	0,01	
4	Fe+As	12.02.2010	D2	0,42	0,04	0,06	0,01	0,00
5	Fe+As	12.02.2010	D2	0,30	0,03	0,12	0,01	
6	Fe+As	12.02.2010	D2	0,22	0,06	0,14	0,01	
7	CA + As	12.02.2010	D2	16,50	1,80	0,50	0,06	0,03
8	CA + As	12.02.2010	D2	18,30	2,06	0,56	0,04	
9	CA + As	12.02.2010	D2	16,50	2,25	0,63	0,13	
1	As	13.02.2010	D3	0,37	0,04	0,03	0,01	0,00
2	As	13.02.2010	D3	0,47	0,04	0,01	0,00	
3	As	13.02.2010	D3	0,46	0,05	0,01	0,00	
4	Fe+As	13.02.2010	D3	0,55	0,04	0,01	0,00	0,00
5	Fe+As	13.02.2010	D3	0,39	0,04	0,01	0,01	
6	Fe+As	13.02.2010	D3	0,48	0,05	0,02	0,01	
7	CA + As	13.02.2010	D3	9,51	0,65	0,14	0,04	<
8	CA + As	13.02.2010	D3	9,50	0,70	0,12	0,02	
9	CA + As	13.02.2010	D3	8,63	0,73	0,20	0,01	
1	As	14.02.2010	D4	0,45	0,05	0,01	0,05	<
2	As	14.02.2010	D4	0,44	0,06	0,01	0,00	
3	As	14.02.2010	D4	0,48	0,06	0,01	0,00	
4	Fe+As	14.02.2010	D4	0,33	0,05	0,01	0,01	0,00
5	Fe+As	14.02.2010	D4	0,48	0,07	0,01	0,01	
6	Fe+As	14.02.2010	D4	0,63	-	0,01	0,01	
7	CA + As	14.02.2010	D4	5,32	0,29	0,08	0,03	-
8	CA + As	14.02.2010	D4	4,69	0,28	0,07	0,01	
9	CA + As	14.02.2010	D4	4,74	0,27	0,09	0,01	
1	As	15.02.2010	D5	3,63	0,18	0,03	0,02	<

2	As	15.02.2010	D5	4,15	0,19	0,02	0,03	
3	As	15.02.2010	D5	4,62	0,17	0,02	0,07	
4	Fe+As	15.02.2010	D5	4,24	0,20	0,04	0,04	0,11
5	Fe+As	15.02.2010	D5	4,65	0,18	0,03	0,04	
6	Fe+As	15.02.2010	D5	3,38	0,23	0,03	0,04	
7	CA + As	15.02.2010	D5	2,97	0,20	0,09	0,03	0,00
8	CA + As	15.02.2010	D5	3,32	0,21	0,11	0,03	
9	CA + As	15.02.2010	D5	3,06	0,23	0,11	0,02	
1	As	16.02.2010	D6	19,60	0,30	0,06	0,06	0,00
2	As	16.02.2010	D6	21,10	0,35	0,04	0,07	
3	As	16.02.2010	D6	24,10	0,34	0,05	0,06	
4	Fe+As	16.02.2010	D6	21,20	0,40	0,07	0,08	0,10
5	Fe+As	16.02.2010	D6	25,10	0,45	0,06	0,07	
6	Fe+As	16.02.2010	D6	23,70	0,45	0,05	0,10	
7	CA + As	16.02.2010	D6	3,25	0,23	0,09	0,04	<
8	CA + As	16.02.2010	D6	3,37	0,23	0,11	0,05	
9	CA + As	16.02.2010	D6	3,04	0,27	0,11	0,04	
1	As	17.02.2010	D7	12,40	0,28	0,05	0,06	<
2	As	17.02.2010	D7	13,60	0,29	0,04	0,06	
3	As	17.02.2010	D7	17,60	0,31	0,05	0,05	
4	Fe+As	17.02.2010	D7	13,50	0,29	0,05	0,06	0,12
5	Fe+As	17.02.2010	D7	13,20	0,27	0,05	0,06	
6	Fe+As	17.02.2010	D7	15,90	0,28	0,05	0,07	
7	CA + As	17.02.2010	D7	1,94	0,19	0,07	0,03	0,00
8	CA + As	17.02.2010	D7	2,26	0,20	0,10	0,05	
9	CA + As	17.02.2010	D7	2,17	0,22	0,10	0,03	
1	RW	18.02.2010	D8	0,82	0,11	0,01	0,01	<
2	RW	18.02.2010	D8	0,75	0,12	0,02	0,00	
3	RW	18.02.2010	D8	0,77	0,13	0,02	0,00	
4	RW, Fe	18.02.2010	D8	0,78	0,14	0,03	0,01	<
5	RW, Fe	18.02.2010	D8	0,64	0,11	0,03	0,01	
6	RW, Fe	18.02.2010	D8	0,99	0,13	0,03	0,01	
7	RW, CA	18.02.2010	D8	0,99	0,12	0,05	0,00	0,01
8	RW, CA	18.02.2010	D8	0,96	0,15	0,06	0,01	
9	RW, CA	18.02.2010	D8	1,01	0,16	0,06	0,01	

Anhang B6-6: pH-Werte während des Sorptions- und Desorptionsversuches.

Datum	Sorptions-/ Desorptions- schritt	SB1			SM1			HS4			GB2		
		As	Fe+As	CA+As	As	Fe+As	CA+As	As	Fe+As	CA+As	As	Fe+As	CA+As
03.02.2010	S1	5,76	5,42	4,24	3,89	3,79	4,05	4,21	3,97	4,10	5,58	5,21	4,29
04.02.2010	S2	5,5	5,4	4,2	3,7	3,6	4,0	4,1	3,9	4,1	5,4	5,2	4,3
05.02.2010	S3	5,29	5,29	4,23	3,67	3,45	4,05	3,77	3,71	4,09	5,27	5,39	4,35
06.02.2010	S4	5,43	5,26	4,33	3,63	3,67	4,16	3,9	3,88	4,19	5,17	5,15	4,39
07.02.2010	S5	3,81	4,19	4,31	3,37	3,27	4,17	3,68	3,55	4,17	4,72	4,62	4,35
08.02.2010	S6	3,59	3,72	4,21	3,12	3,11	4,04	3,44	3,37	4,12	4,56	4,7	4,3
09.02.2010													
10.02.2010		4,13	4	4,31	3,36	3,3	4,19	3,59	3,56	4,19	4,73	4,73	4,3
11.02.2010	D1	4,05	4,11	4,45	3,54	3,51	4,33	3,85	3,83	4,35	5,16	5,07	4,41
12.02.2010	D2	4,86	4,84	4,37	3,69	3,67	4,31	3,87	3,79	4,25	5,39	5,28	4,37
13.02.2010	D3	5,35	5,04	4,36	3,9	3,82	4,39	4,04	3,79	4,33	5,55	5,55	4,45
14.02.2010	D4	5,64	5,71	4,49	4,12	4,04	4,57	4,01	4,05	4,43	5,6	5,62	4,53
15.02.2010	D5	5,67	5,82	4,65	4,3	4,28	4,81	4,28	4,21	4,6	5,82	5,83	4,75
16.02.2010	D6	5,77	5,87	4,66	4,37	4,39	4,94	4,31	4,24	4,65	5,82	5,85	4,82
17.02.2010	D7	5,73	5,86	4,68	4,48	4,47	5,11	4,42	4,48	4,73	5,92	6,01	4,93
18.02.2010	D8	5,9	6,01	4,96	4,57	4,56	5,29	4,56	4,48	4,88	6,04	6,09	5,08