

Aluminium im Trinkwasser - Vorkommen und Möglichkeiten zur Entfernung

Das Element

Aluminium ist ein silbrig-weißes Leichtmetall mit dem Elementsymbol Al und der Ordnungszahl 13 in der 3. Hauptgruppe des Periodensystems. Es besitzt neben einer guten elektrischen auch eine gute Wärmeleitfähigkeit bei einer geringen Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$.

Vorkommen

Es ist das dritthäufigste Element und häufigste Metall in der Erdkruste. Der Massenanteil von Aluminium an der Erdhülle beträgt knapp 8%. Es liegt als unedles Metall hauptsächlich chemisch gebunden als Alumosilicat in Ton, Gneis und Granit vor. Daneben liegt Aluminium auch als Aluminiumoxid in Form von Korund vor.

Zur großtechnischen Aluminiumproduktion dient Bauxit als Rohstoff. Dieser enthält ungefähr 60% Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$ und $\text{AlO}(\text{OH})$). Abbaubare Vorkommen an Bauxit liegen weltweit verteilt. Bei der Produktion von Aluminium wird das im Erz enthaltene Aluminiumoxid/-hydroxid-Gemisch zunächst mit Natronlauge aufgeschlossen und dann zu Aluminiumoxid (Al_2O_3) gebrannt.

Die Produktion an Aluminium weltweit lag 2009 bei 36,9 Mio. Tonnen.¹

Bedeutung für den Menschen

Für sämtliche Lebewesen hat Aluminium keine essentielle Bedeutung und gelangt nur "zufällig" in den Körper des Menschen, hauptsächlich durch den Verzehr von Lebensmitteln:

- pflanzliche Lebensmittel (aufgrund sauren Regens während des Anbaus)
- saure Speisen in Kontakt mit Aluminiumgeschirr/Besteck/Folie
- Lebensmittelzusatzstoff E 173
- Trink- und Mineralwässer

Daneben nimmt der Normalbürger Aluminium durch:

- Arzneimittel
- Kosmetikprodukte
- Zahnpasta auf.

Der gesunde Mensch scheidet das aufgenommene Aluminium in der Regel über die Niere (Urin) wieder aus, trotzdem liegt in jedem Menschen eine gewisse Konzentration an Aluminium vor, welche ab einem gewissen Grad gesundheitliche Schäden verursachen kann. Dies ist bereits seit den Siebziger Jahren bekannt. Die wichtigsten toxischen Wirkungen sind dabei Blutarmut (Anämie), Arthritis und Enzephalopathie (Gedächtnis- und Sprachstörungen, Antriebslosigkeit und Aggressivität). Ab $0,8 \text{ mg/L}$ verursacht Aluminium Laktanz.

Die Grenzwerte an Aluminium im Trinkwasser werden von der WHO sowie von der TrinkwV mit $0,2 \text{ mg/l}$ angegeben, Kanada und Schweden geben $0,1 \text{ mg/l}$ vor.

¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_größten_Aluminiumproduzenten

Aluminium im Wasser

Die aquatische Chemie des Aluminiums ist relativ komplex. Es liegt im Wasser in verschiedenen Formen vor. Als amphotere Hydroxid-Verbindung kann es sowohl im sauren als auch im alkalischen Medium löslich sein. In wässrigen Lösungen liegt ein pH- und Anionen-abhängiges Gleichgewicht zwischen Aluminat ($\text{pH} > 7,5$), neutralem suspendiertem polymerem Aluminiumhydroxid ($\text{pH} 5,5 - 7,5$) und kationischen Komplexen ($\text{pH} < 5,5$) vor. Bei neutralem pH-Wert ist Aluminium praktisch unlöslich. Aufgrund seiner hohen Ladungsdichte bildet das Al^{3+} Ion mit anorganischen (OH^- , F^- , SO_4^{2-}) und sauerstoffhaltigen organischen Liganden (Humin- und Fulvinsäuren) stabile Komplexe. Die Komplexbildung ist abhängig vom pH-Wert, von der Konzentration der Liganden, der Ionenstärke und der Wassertemperatur. Die Löslichkeit von Aluminium steigt bei pH-Werten unter 6 und über 8 sowie bei Anwesenheit von Liganden stark an.

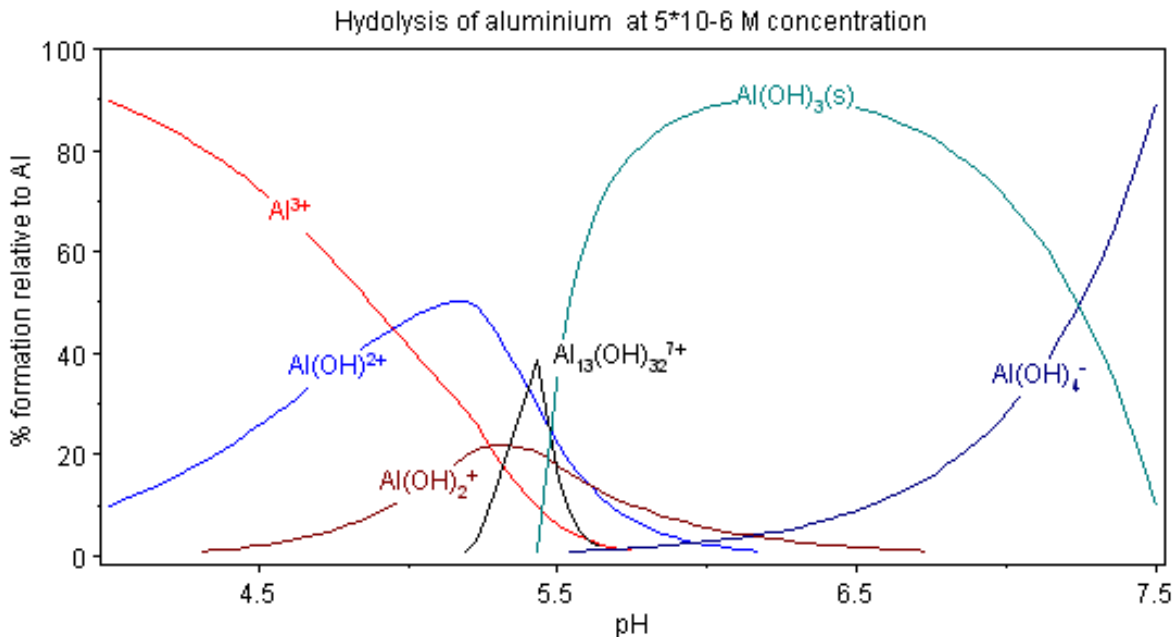


Abb. 1: Die Hydrolyse von Aluminium, Modellierung einer $5 \mu\text{M}$ Lösung Al_3^+ mit HySS2009²

Bei pH-Werten unter 5,5 liegen die Aluminiumhydroxide $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ und $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+}$ vor, steigt der pH-Wert, so fällt $\text{Al}(\text{OH})_3$ aus der Lösung aus. Bei weiterem Anstieg des pH-Wertes geht Aluminiumhydroxid wieder in Form von $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ in Lösung.

Entfernung von Aluminium

Um Aluminium aus Wasser zu entfernen, muss der pH-Wert des betreffenden Wassers in einen Bereich der minimalen Löslichkeit von Aluminiumhydroxid verschoben werden (siehe **Abb. 1**). Bei sauren Rohwässern kann dies durch Zugabe von alkalischen Stoffen geschehen. Zur Entfernung bieten sich dann verschiedene Verfahren an, wie die KDF-Filtration, Membranfiltration oder die Adsorption an Aktivkohle.

Membranverfahren eignen sich zur Entfernung von Aluminium aus Trinkwasser, sofern das Aluminium im Wasser ungelöst vorliegt. Hierzu muss der pH-Wert des Rohwassers so eingestellt werden, dass die Löslichkeit von Aluminiumhydroxid ein Minimum aufweist. Mittels vorgeschalteter Entsäuerung lässt sich der pH-Wert des Rohwassers auf einen Bereich von 6,5 - 7 einstellen, in welchem sich die $\text{Al}(\text{OH})_3$ - Flocken problemlos abtrennen lassen. Wird im vorhergehenden Schritt jedoch zu stark entsäuert, so geht ein Teil des gefällten Aluminiumhydroxids aufgrund amphoterer Reaktionen wieder in Lösung (vgl. **Abb. 1**).

Das **KDF-Filter** (Kinetic Degradation FLuxion) besteht aus Granulaten von Kupfer- und Zinklegierungen und wurde 1984 von Don Heskett erfunden und patentiert (US 5951869). Dem Filter wird eine Effektivität gegenüber Mineralien, Metallen, gelöstem Sauerstoff und organischen Stoffen nachgesagt. Grundlage dieser relativ unspezifischen Filtrationseigenschaften sind die an der Oberfläche des Filters stattfindenden Redoxreaktion der Wasserinhaltsstoffe mit den Cu/Zn-Legierungen. Jedes Element besitzt eine elektrische und magnetische Ladung. Positiv geladene Moleküle werden im KDF-Filter vom unedlen Metallion Zink angezogen, negativ geladene Moleküle wiederum vom Edelmetall Kupfer. Das KDF-Filter fungiert somit als eine Art Elektrolysezelle mit Zink als Anode und Kupfer als Kathode. Metallionen im Wasser lagern sich nun an der jeweiligen Oberfläche des Filters an, nichtmetallische Ionen im Wasser bilden Zinkoxid bzw. Kupferhydroxid. Dabei kann auch Ozon entstehen, welches gleichzeitig auf Bakterien, Algen und Pilze im Wasser wirkt. Häufig wird das Filtermaterial in Kombination mit Aktivkohle eingesetzt, generell jedoch als Vorfilter vor weiteren Wasserbehandlungsanlagen wie Umkehrososen, Membranfiltern oder Ionenaustauschern.

Im Gegensatz zum Membranverfahren findet die Adsorption an **Aktivkohle** vorrangig bei gelöstem Aluminium statt. Verschiedene Studien kommen zu dem Schluss, dass sich gelöstes Aluminium am besten bei pH 4 an Aktivkohle adsorbieren lässt. Die dabei mögliche Rückhalteleistung an Aluminium ist sowohl von der Art der Aktivkohle sowie von den Wasserparametern und den Umgebungsbedingungen abhängig. Aktivkohle lässt sich aus unterschiedlichsten Materialien herstellen. So führen Autoren beispielsweise als Grundstoff im Gegensatz zu heimischen Materialien die Hülsen von Reis oder Kokosnussfasern an. Aktivkohlen unterscheiden sich hinsichtlich:

- der verfügbaren Oberfläche,
- des Porenvolumens,
- der Dichte,
- des Kohlenstoffgehalts,
- der Partikelgröße sowie
- der Art der Aktivierung.

Die Wasserparameter haben einen starken Einfluss auf die Adsorptionsleistung der Aktivkohle, hier steht der pH-Wert des Wassers an erster Stelle weil er bestimmt, in welcher Form Aluminium im Wasser vorliegt (vgl. **Abb. 1**). In diesem Zusammenhang ist auch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Rohwassers sowie die Wasserhärte zu beachten. Da die Adsorption von Aluminium an Aktivkohle eine exotherme Reaktion ist, stellt die Temperatur des Wassers eine weitere Einflussgröße dar. Je höher die Temperatur, desto niedriger die Adsorptionsrate. Ebenso ist die eigentliche Konzentration an Aluminiumionen im Rohwasser maßgeblich. Hier sinkt die Adsorptionskapazität mit steigender Konzentration an Al-Ionen im Rohwasser. Natürlich kommen im Trinkwasser nicht nur Al-Ionen vor, sondern die Ionen verschiedenster Elemente. Da Aktivkohle nicht zwingend selektiv wirkt, spielt hier die Ionenstärke des Rohwassers ebenfalls eine große Rolle. Dieser Fakt wird in der Literatur nur ungenügend bzw. gar nicht berücksichtigt, Experimente wurden fast ausschließlich mit reinen Al-Lösungen durchgeführt. Die Übertragbarkeit dieser Untersuchungsergebnisse in die Praxis ist damit sehr fragwürdig. Als weitere Einflussgröße für das Adsorptionsverhalten sei hier die Kontaktzeit des Trinkwassers mit der Aktivkohle genannt.

Grundsätzlich geschieht die Adsorption an Aktivkohle aufgrund unspezifischer Wechselwirkungen. Verschiedene Aktivkohlen weisen unterschiedliche Mechanismen auf. Neben physikalischer und chemischer Adsorption kann auch ein Ionenaustausch an Aktivkohle auftreten. So gehen *Al-Muhtaseb et al.* beispielsweise davon aus, dass an ihrer untersuchten kommerziellen Aktivkohle ein Ionenaustausch mit Aluminium stattgefunden hat, währenddessen bei selbst hergestellter Aktivkohle physikalische oder chemische Adsorption für die Aluminiumreduktion verantwortlich war. *Singh et al.* fanden heraus, dass Reishülsenkohle die beste Adsorptionsleistung im Vergleich zu aktivierter Reishülsenkohle und kommerzieller Aktivkohle hat. Beide Studien nutzten Kohlen/Aktivkohlen in loser Schüttung und fanden ein Adsorptionsmaximum bei pH 4 heraus.

FAZIT

Aktivkohle ist prinzipiell zur Entaluminierung wässriger Lösungen geeignet. Dies bestätigen wissenschaftliche Experimente. Inwieweit die Ergebnisse dieser Experimente auf die Entfernung von Aluminium aus Trinkwasser mit Hilfe von kommerziell erhältlichen Aktivkohlefiltern (insbesondere Aktivkohlefilterblöcken) übertragbar sind, ist in eigenen Versuchen zu überprüfen. Hier muss insbesondere auf die Systembedingungen wie Wasserhärte bzw. Ionenstärke, pH-Wert und Temperatur sowie Verweilzeit des Trinkwassers im Aktivkohleblock Augenmerk gelegt werden. Am Zweckmäßigsten erscheint die Verwendung eines mit Aluminium dotierten Trinkwassers mittlerer Härte (mit den sonst üblichen Konzentrationen gemäß TrinkwV). Dieses Trinkwasser sollte kontinuierlich durch den zu untersuchenden Aktivkohlefilter geleitet werden und die Konzentration an Aluminium im Filtrat nach definierten Teilvolumina bestimmt werden, um die generelle Rückhalteleistung sowie eine Durchbruchkurve und damit die Standzeit des Filters zu bestimmen. Die Durchbruchkurven sollten bei verschiedenen pH-Werten aufgenommen werden, da Aluminium in verschiedenen Formen pH-Wert abhängig im Wasser vorliegt. Empfehlenswert sind hier Schritte im Bereich von 0,5 pH-Stufen. Die Temperatur ist über die gesamten Versuche konstant zu halten, ebenso ist darauf zu achten, dass sich die Parameter des Rohwassers während der Versuche nicht ändern.

Für eine detaillierte Versuchsplanung steht Ihnen die LAGOTEC gern zur Verfügung.

Literatur

Grohmann, A. (Hrsg.) (2003): Die Trinkwasserverordnung: Einführung und Erläuterungen für Wasserversorgungsunternehmen und Überwachungsunternehmen, S. 401-504.

Wood, J.M. (1985): Effects of Acidification on the Mobility of Metals and Metalliods: An Overview, Environmental Health Perspectives, Vol. 63, S. 115-119.

Robert W. Gensemer & Richard C. Playle (1999): The Bioavailability and Toxicity of Aluminum in Aquatic Environments, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 29:4, S. 315-450.

Krause S., Herb S. (2003): Entfernung von Aluminium im Membranverfahren, Wasserwirtschaft Wassertechnik 9/2003, S. 17-23.

Al-Muhtaseb S.A. et al. (2008): Removal of aluminum from aqueous solutions by adsorption on date-pit and BDH activated carbons, Journal of Hazardous Materials 158, S. 300-307.

Singh T.S. et al. (2006): Investigation on the sorption of aluminium in drinking water by low-cost adsorbents, Water SA Vol. 32 No. 1, S. 49-54.