Schonende Entnahme von Materialproben aus Bohrungen in grobkörnigen grundwasserführenden Lockergesteinen ohne Luftkontakt

Eduard Hoehn, Peter Honold

Kurzfassung

Um die Beschaffenheit von grobkörnigem, nicht kohäsivem Lockergesteinsmaterial zu bestimmen, mußten Proben aus Bohrungen vorgelegt werden, die mit ihrem Porenwasser, d. h. unter Luftabschluß und mit geringer mechanischer Störung, entnommen worden waren. Die schonende Entnahme der Festphasen aus dem Untergrund erfolgt mit einem Doppelkernrohr, bei welchem das Innenrohr durch ein transparentes Hart-PVC-Rohr ersetzt worden ist. Bei dieser Bohrtechnik, die in Zukunft vermehrt angewendet werden dürfte, wird der Vortrieb durch einen direkt auf das Kernrohr aufgesetzten Imlochhammer unterstützt. Die in das PVC-Rohr eingeschobene Probe wird nach dem Ausbau aus dem Kernrohr an den Enden sofort verschlossen, um zu verhindern, daß Luft eindringen kann. Mit solchen Materialproben konnte die Belegung von Oberflächen mit Eisen, welches für eine Reduktion verfügbar ist, gemessen werden. Als Beispiel hierfür werden alte Kompartimente einer Deponie vorgestellt, in welchen festgestellt wurde, daß Eisen früher mehr ausgelaugt worden war als heute.

Abstract

The characterisation of non-cohesive sandy and gravelly aquifer materials from bore cores of a depth of up to 15 m requires samples which have to be taken air-tight and with little physical disturbance. To this end, we decided to use a double core barrel for the sampling whose inner tube was replaced by a liner of translucent hard polyvinyl chloride (PVC) plastic. With this drilling technique, the penetration is supported by a percussion hammer which is placed directly in front of the core barrel. The sample which enters the PVC tube is plugged at the edges immediately after the removal from the core barrel to prevent air from penetrating the sample. As an example of the applicability of this method, we measured the coating of material surfaces which is available for reducible iron in such samples. An analysis of the speciation of Fe allowed to make conclusions on the past activity of the aquifer system in the presence of a leaching old landfill. We thus believe that the procedure chosen for sampling solid materials from the subsurface can be used more frequently in the future, to discuss the leaching behavior of contaminated sites.

Einführung und Problemstellung

Eine fachgerechte Erkundung von Verunreinigungen des Grundwassers umfaßt Felduntersuchungen und stoffspezifische Laborversuche an Grundwasserleiter-Material und Grundwasser unter kontrollierten Bedingungen sowie Modellrechnungen von Grundwasserströmung, Stofftransport und chemischer Beschaffenheit des Grundwassers („prozeßorientierte Untersuchungen“). Wechselwirkungen einzelner Schadstoffe zwischen Gestein und Grundwasser werden stark durch mikrobielle Umsetzungen und durch die Konzentrationen (Partialdrucke) an Sauerstoff und Kohlendioxid im Grundwasser beeinflusst. Deshalb sollten diese Untersuchungen an Materialien von Bohrkernen durchgeführt werden.

Bei Altlasten besteht ein hohes Gefährdungspotential für Grundwasserverunreinigungen, einerseits Standorten von Altdeponien mit Abfall und andererseits alten, verunreinigten Industriestandorten. Im Altlasten-Konzept für die Schweiz (BUWAL 1994)

Dr. E. Hoehn,
Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung,
Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG),
CH-8600 Dübendorf,
Telefon: +41-1-823-5525, Telefax: +41-1-823-5028,
E-Mail: hoehn@eawag.ch

Dr. P. Honold,
Geocontrol AG,
CH-8006 Zürich,
Telefon: +41-1-362-1874, Telefax: +41-1-362-4756

Eingang des Beitrages: 17.09.98

Eingang des überarbeiteten Beitrages: 21.06.99

setzt sich dieses Risiko zusammen aus dem Schadstoffpotential, dem Freisetzungspotential sowie der Exposition und der Bedeutung der Schutzgüter. Eine systematische Altlastenbearbeitung läuft gemäß diesem Konzept in vier Phasen ab: Erfassung, „Historische“ und „Technische“ Voruntersuchung, Detailuntersuchung und Untersuchung für ein Sicherungs- bzw. Sanierungsprojekt.

Im Gegensatz zum Auslaugvermögen von Altdeponien, d. h. dem Freisetzungspotential ins Grundwasser, ist ihre stoffliche Zusammensetzung schwierig zu bestimmen. Messungen von Stoffkonzentrationen in Sickerwässern und im Grundwasser unmittelbar unterhalb der Altdeponien repräsentieren oft relativ große Teilbereiche dieser Standorte. In der Altlasten-Verordnung der Schweiz wird vorgeschlagen, Eluate mittels eines Säulentests im Labor mit Festphasenmaterial aus der Altdeponie zu bestimmen (BUWAL 1997).

Im Rahmen des „EAWAG-Forschungsschwerpunkts 1993–1997“ (FoSP) wurden prozeßorientierte Labor- und Felduntersuchungen über Belastungen des Grundwassers durch Altdeponien mit vorwiegend Hauskehricht durchgeführt. Für die Untersuchungen wurde die Region von Winterthur ausgewählt, weil in diesem Gebiet die Umweltbelastungen infolge der früher bedeutenden metallverarbeitenden Industrie (z. B. Gießereien) besonders hoch sind. Von besonderem Interesse war das Gebiet Riet im Nordosten von Winterthur, weil dort die Stadt Winterthur seit ca. 1910 einen nennenswerten Anteil ihrer Abfälle entsorgt. Zudem wollten wir möglichst allgemeingültige Bewertungskriterien für Altdeponien mit vorwiegend Hauskehricht

aufstellen. Neben den heutigen, gegen den Untergrund hin abgedichteten Deponieteilen bestehen vier Kompartimente mit unabgedichteten Altablagerungen (Altdeponien I–III in Abb. 1: Altdeponie I, Betriebsphase 1918–1925; Altdeponie II, 1925–1935; Altdeponie III, 1950–1960 sowie eine ebenfalls unabgedichtete Multikomponenten-Deponie, 1960–1990).

Hinweise über das Langzeitverhalten einer Altdeponie nach Abschluß der Betriebsphase sind unseres Erachtens nur über eine Untersuchung von Festphasen möglich. Ein wichtiges Ziel unserer Untersuchungen war es, die Verteilung zwischen Festphasen (Altlastenmaterial und Gestein) und Wasser (Grund- und Sickerwasser) ausgewählter anorganischer Schadstoffe besser zu verstehen, insbesondere solcher, die in sauerstofffreiem Wasser anders vorliegen als in sauerstoffhaltigem (Abhängigkeit vom Redox-Potential). Dies kann am Beispiel von Eisen oder Schwefel gezeigt werden, weil diese Elemente in der Natur in der Regel in genügend hohen Konzentrationen vorkommen (AMIRBAHMAN et al. 1998). Die Art, in welcher z. B. das Eisen vorliegt, hilft mit, das Langzeitverhalten einer Altdeponie besser zu verstehen.

Geologische und hydrogeologische Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Aus hydrogeologischen Erkundungen in diesem Gebiet, zusammengefaßt beispielsweise durch SIMMLER (1993) und HUGGENBER-

Abb. 1: Lageskizze der Altdeponien am Standort Riet in Winterthur und der Probennahmestellen; gestrichelte Linien: Sickerleitungen; dicke Linie: Spur des geologischen Profils, vgl. mit Abb. 4.

GER et al. (1999) sowie Messungen der STADT WINTERTHUR (1996) ist folgendes bekannt: Die Deponie Riet liegt in einem Moränen-gebiet, am Rand der Talfüllung des Wiesendanger Feldes. Die Basis der Talfüllung besteht aus Mergeln und Sandsteinen der Oberen Süßwassermolasse. Die Talfüllung selbst wurde von uns nur bis in geringe Tiefen von max. 14 m erkundet (s. auch JOHNSON & HOEHN 1997). Hier liegt zuunterst lehmiges und schlecht wasserdurchlässiges Material einer Grundmoräne (diamiktischer Geschiebemergel, d. h. feinkörnige Matrix mit Geröllen), darüber gefolgt von sauberen fluvioglazialen, alluvialen Kies-Sand-Ablagerungen (quartärer Niederterrassenschotter). Der Schotter ist sehr gut wasserdurchlässig und wirkt als Grundwasserleiter. Über dem Schotter liegen örtlich feinkörnige Seeablagerungen oder Torf. Letzterer wurde aber bis Ende des letzten Jahrhunderts nahezu vollständig ausgebeutet. Die Altdeponien 1 bis 3 entstanden großenteils als Auffüllungen der Torfmulden. Die Durchlässigkeit des Schotters wurde mittels Kornverteilungskurven aus Kernmaterial bestimmt (Hüllkurven aus 27 Proben). Die Form der Verteilungskurven kann über weite Bereiche als Fullerkurve angenähert werden [$P = (d/D)^{1/2}$; P = gewichtsmäßiger Anteil des Durchgangs; d = Korndurchmesser des Siebdurchgangs; D = größter Korndurchmesser]. Diese Kornverteilungen ergeben nach CASATI (1959) näherungsweise eine Durchlässigkeit des Materials für Wasser von $k_f = 7 \cdot 10^{-4}$ bis $2 \cdot 10^{-3}$ m/sec. In-situ-Messungen mit Pumpversuchen in den Bohrlöchern und in den darin eingebauten Beobachtungsrohren mit 2" Durchmesser ergaben, ausgewertet nach KÖRNER (1957), leicht niedrigere Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = 2 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-3}$ m/sec. Die nutzbare Porosität wurde zu 20 % angenommen. Mit einem Großteil der gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte konnte die Grundwasserströmung modellmäßig nachgebildet werden (PETER 1997). Im Schotter des Wiesendanger Feldes fließt ein Grundwasserstrom generell von Norden nach Süden (Abb. 1; Mächtigkeit des Grundwassers: 10–20 m; mittleres Gefälle: ca. 0,5 %; Fließgeschwindigkeit des Grundwassers, als Abstandsgeschwindigkeit abgeschätzt: 0,5–5 m/d). Der Grundwasserstrom mündet nach ca. 2 km in den Grundwasserstrom des Eulachtals, der zur Trinkwassergewinnung genutzt wird. Der randliche Zufluß aus dem Bereich der Altdeponien Riet dürfte nur gering sein. Der Flurabstand ist im Gebiet der Altdeponie II sehr klein (rund 1–2 m). Deshalb liegt dort die Grundwasseroberfläche bei hohen und mittleren Grundwasserständen örtlich in der künstlichen Auffüllung. Bei der Altdeponie III liegt er in 2 bis 5 m Tiefe. Im Nahbereich der Altdeponien wurden im Grundwasser insbesondere ein Mangel an gelöstem Sauerstoff und das verstärkte Auftreten von gelöstem Mangan und Eisen festgestellt, was in für Trinkwassergewinnung genutzten Grundwässern unerwünscht ist (z. B. SIMMLER 1993).

Materialien und Vorgehen

Um in Laborversuchen die biologische Verfügbarkeit von Eisen im Untergrund zu bestimmen, wurden grundwassergesättigte Materialproben benötigt. Die Proben mußten dem Untergrund so wenig gestört als möglich und ohne Zutritt von Luft entnommen und für die Laboruntersuchungen bereitgestellt werden. Im Rahmen der Erkundung der beiden Altdeponie-Standorte ließen wir Kernbohrungen mit einem modifizierten Doppelkernrohr abteufen. Die Bohrungen 1 bis 6 wurden bei der Altdeponie III entlang der aus den früheren Untersuchungen vermuteten Grundwasserfließrichtung angeordnet. Die Bohrungen 10 bis 14 liegen entlang einer aus geophysikalischen Untersuchungen (HUGGENBERGER et al. 1998) und Tracerbeobachtungen (HOFER et al. 1997) vermuteten Fließrichtung des Grundwassers im Bereich der Altdeponie II. Die Bohrungen 20 bis 23 liegen im Bereich der Altdeponien I und III. Neben der geologischen Aufnahme des Bohrgutes und der schonenden Entnahme der Bohrkerne ohne Luftkontakt dienten die Bohrungen dem Einrichten von Meßstellen zur Grundwasserbeobachtung und -probennahme.

Für die Entnahme von Bohrkerne aus den Schotterablagerungen muß zur Erhaltung der Materialstruktur und der Schichtwechsel eine möglichst schonende Entnahmetechnik gewählt werden. Diese muß der Zusammensetzung und der Lagerungsdichte des Materials angepaßt werden. Erschwernisse bilden eingelagerte Steine und Blöcke, die angebohrt oder durchbohrt werden müssen. Heikel ist die Entnahme von locker gelagertem, wassergesättigtem Material bei Bohrarbeiten unter dem Grundwasserspiegel, da ein hydraulischer Gradient vermieden werden muß. Im nicht kohäsiven Material kann der Vortrieb des Kernrohrs jedoch durch ein abgewogenes, stetiges Schlagen verbessert werden. Das Grobkorn wird durch die Erschütterungen in das Kernrohr eingeleitet oder verdrängt. Der aufgebohrte Kern wird durch die Rotationsbewegung mitbewegt und dabei vermischt. Ein sorgfältiges Auspressen der Materialkerne aus dem Kernrohr ermöglicht eine gute Wiedergabe des Schichtaufbaus, d. h. der Wechsellagerung von sandigen und kiesigen Lagen. Den gestellten Anforderungen an die Untersuchungen der Grundwasserleiter unter den Altdeponien von Winterthur vermochte diese Bohrtechnik jedoch nicht zu genügen. Das gesteckte Ziel, Kernmaterial bei der Entnahme nicht mit der Luft in Berührung kommen zu lassen, konnte mit den folgenden Anpassungen der Bohrtechnik erreicht werden, die unseres Wissens in diesem Gestein zum ersten Mal zur Anwendung kamen.

Doppelkernrohr mit Innenrohr aus Hart-PVC

Um die Struktur des Materials zu erhalten und seine Vermischung während der Bohrarbeiten zu unterbinden, wurde ein

Abb. 2: Schema des Imlochhammer-Kernrohrs (Gesamtarbeitslänge: ca. 3,0 m)

Abb. 3: Mit Probenmaterial gefülltes Hart-PVC-Innenrohr (Liner) im Kernrohr, nach dem Rohrrückzug

Doppelkernrohr eingesetzt. Das Innenrohr ist gegenüber dem konventionellen Doppelkernrohr durch ein Hart-PVC-Rohr mit 2 mm Wandstärke (Liner) ersetzt, in welches das Material beim Vortrieb eingestoßen wird. Das Innenrohr ist bei den Bohrarbeiten von der Rotation des Kernrohrs und der Kernrohrkrone unabhängig. Für die Bohrarbeiten in Winterthur wurde das 2,5 t schwere Raupenbohrgerät „Polyhydraul“ eingesetzt, mit dem auch schlecht tragfähige oder schwer zugängliche Stellen problemlos erreicht und beprobt werden können. Der Vortrieb wird bei dieser Bohrtechnik durch einen direkt auf das Kernrohr aufgesetzten Imlochhammer unterstützt (Abb. 2). Diese Technik wurde gezielt in Kies-Sand-Schichten angewendet, nachdem das geologische Bohrprofil aufgrund einer tiefen Kernbohrung bereits bekannt war.

Vortrieb mit dem Imlochhammer

Das Kernrohr mit dem eingebauten PVC-Innenrohr wird über einen Kernrohrkopf unter dem Imlochhammer aufgesetzt. Dadurch wird die Schlagkraft für den Vortrieb direkt auf das Kernrohr und die Kernrohrkrone übertragen. Das Imlochhammerkernrohr (Abb. 3) wird mit dem Bohrgestänge im verrohrten Bohrloch abgesenkt und mit dem Drehkopf des Bohrgestängs verbunden. Der Vortrieb des Kernrohrs in das anstehende

Lockergestein erfolgt durch das Schlagen des Imlochhammers (Halco Mach 44V) und wird durch ein langsames Drehen des Gestänges über den hydraulischen Drehkopf unterstützt, und zwar so, daß die Krone möglichst schonend ins Material einschneidet. Der Durchmesser der mit Hartmetallstiften bestückten Bohrkrone beträgt 139 mm. Das aufgebohrte Material wird direkt hinter dem Schneidring der Krone und einem eingesetzten Kernfänger in das eingesetzte PVC-Rohr eingeschoben. Der Kernfänger verhindert das Ausrutschen der Probe beim Kernrohr-Rückzug. Die Probenlänge beträgt 80 bis 100 cm. Die Qualität des so gewonnenen Kerns ist von der Erfahrung und dem Fingerspitzengefühl des Bohrmeisters abhängig. Im Verlauf der Bohrarbeiten wurde von grauem auf transparentes PVC-Material gewechselt. Dies hatte den Vorteil, daß die entnommenen Gesteinsschichten auch im Liner erkennbar sind. Das Bohrloch muß im aufgebohrten Bereich über eine Außenverrohrung verkleidet werden. Die Entnahme von Proben mit dem PVC-Innenrohr kann gezielt, in unserem Fall in der obersten, wassergesättigten Zone, angesetzt und ohne weiteres auch mit normalen Bohrarbeiten kombiniert werden. In diesem Bereich mußten die Einflüsse der Bodenluft möglichst ausgeschlossen werden. Um Struktur und Textur der Bohrkerns sowie die Beschaffenheit der Kornoberflächen nicht zu verändern, muß im Grundwasserbereich während des gesamten Bohrvorgangs sichergestellt werden, daß kein Druckgefälle entsteht und vom Imlochhammer keine Druckluft auf die Bohrlochsohle entweichen kann.

Transport und Lagerung der Materialproben

Nach der Entnahme aus dem Kernrohr (langsames Herausziehen) wurde das PVC-Rohr ausgebaut. Der Kontakt mit der Luft beschränkte sich auf die beiden Enden, die sofort mit Plastik-Deckeln verschlossen wurden. Anschließend wurden die PVC-Rohre auf der Bohrstelle mit mehreren Lagen von Saran-Film umwickelt und in Teflon-Säcke verpackt. Die Säcke wurden mit Argongas gespült und für den Transport ins Labor verschweißt. Im Labor wurden die in den transparenten PVC-Rohren gelagerten Bohrkerns gefroren, danach in ca. 30 cm lange Stücke geschnitten und in eine mit Handschuhen von außen bediente und mit Argon-Gas gefüllte, luftdicht abgeschlossene Box (glove box) überführt.

Abb. 4: Hydrogeologisches Profil durch die Altdeponien III und I, entlang der Profils- spur aus Abb. 1
(Geologische Abfolge: w = künstliche Auf- füllung, h = Humus, g = Kies-Sand, t = Mo- räne; p = ins Profil projizierte Bohrung; feine Linien neben den Bohrprofilen: Grundwasserbeobachtungsrohre mit Voll- rohr und Filterstrecken; davon gestrichelt: Filterstrecke; dicke Linien beidseits des Bohrprofils: mit PVC-Linern entnommene Materialproben; strichpunktiert: Grund- wasser Oberfläche am 07.02.1997.)

Chemische Analysen

Mit den einzelnen Proben wurden unter Argon-Atmosphäre Versuche zur reduktiven Auflösung von Eisen durchgeführt. Hierfür wurden jeweils nur die mittleren 10 cm einer Probe verwendet. Die chemische Analyse der Proben umfaßte unter anderem eine reduktive Auflösung von Eisen mit Ti(III)-EDTA und mit Ascorbat. Mit der ersten Methode kann der Gesamtanteil an festen [Fe(III)-(Hydr)oxid] Eisenphasen, mit der zweiten der Anteil an amorphen [Fe(III)-(Hydr)oxid] Eisenphasen bestimmt werden (AMIRBAHMAN et al. 1998).

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der beschriebenen Bohrkampagne ergänzten die aus früheren Untersuchungen bekannte geologische Abfolge. Die Mehrheit der Bohrungen zeigte humosige bis moorige Deckschichten. Die Bohrungen innerhalb der Altdeponie enthielten als oberste Schicht künstliche Auffüllungen von bis zu 4 m. Darunter folgte Schottermaterial mit den in Abbildung 5 dargestellten Kornverteilungen.

In den Bohrkern-Proben wurde der Anteil der verschiedenen Formen von Eisen [Fe(III)] in fester Phase (amorph und kristallin) gemessen, welcher für eine Reduktion zu Fe(II) verfügbar ist. Die Ergebnisse weisen darauf hin, daß in den Altdeponien und dem Schottermaterial im Abstrom des Grundwassers früher stärker reduzierende Bedingungen geherrscht haben müssen als heute (AMIRBAHMAN et al. 1998). Abbildung 6 zeigt eine Zunahme der Fe(III)-Gehalte im Altdeponie- und Schottermaterial von der Altdeponie III gegen die Altdeponie I hin und ins nicht verunreinigte Umfeld. Im Material der Bohrungen innerhalb der Altdeponien liegt Fe(II) teils gelöst, teils an Gesteinsoberflächen sorbiert sowie in Form von Eisensulfid vor. Der Ausdruck „stärker reduzierende Bedingungen“ bedeutet, daß früher mehr organischer Kohlenstoff für die Reduktion von Eisen(III) zur Verfügung gestanden hat als heute. Offenbar

ist die Altdeponie durch die Wirkung von Bakterien „gealtert“, d. h. sie ist heute in einem Zustand, in dem weniger Stoffe ausgewaschen werden als früher. Die Altdeponie III weist weder eine Oberflächenabdeckung noch eine Basisabdichtung auf. Deshalb wird sie durch versickertes Niederschlagswasser im Laufe der Zeit ausgewaschen. Örtlich kann sie bei sehr hohen Wasserständen auch ins Grundwasser zu liegen kommen, was den beobachteten Vorgang verstärkt.

Folgerungen für die Praxis

Grundwasser im Abstrom von Altdeponien mit vorwiegend Hauskehricht, welche nach unten nicht abgedichtet sind, ist in vielen Fällen sauerstofffrei oder sauerstoffarm und weist gelöstes Eisen und Mangan auf. Für die Beurteilung des Risikos einer Grundwasserverunreinigung muß nicht nur die Beschaffenheit des Grundwassers selbst, sondern auch die stoffliche Zusammensetzung der Festphase (Altdeponie- und Grundwasserleitermaterial) sowie die Auslaugbarkeit von Stoffen aus diesen Festphasen bekannt sein. Dank der hier beschriebenen neuen Methode konnte aus der Beschaffenheit der Festphase festgestellt werden, daß sich die physikalisch-chemischen Bedingungen in den Altdeponien Riet, Winterthur, sowie im Gesteinsmaterial im Abstrom des Grundwassers im Lauf der Zeit geändert haben. In Zukunft werden auch bei anderen Altdeponien chemische Untersuchungen an schonend und ohne Luftkontakt entnommenem Grundwasserleitermaterial nötig sein.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch die Stadt Winterthur, Abteilung Tiefbau, und den Kanton Zürich, Amt für Wasser, Energie und Luft (AWEL), finanziell unterstützt. Die Liner-Bohrtechnik mit dem Imlochhammer wurde unternehmerseitig durch die Bohrequipe der Firma Geocontrol AG, den Herren

Abb. 5: Hüllfläche von Summenkurven der Korngrößenverteilung von Materialproben aus dem Schotter beim Standort Riet (Siebteil: 2 bis 0,063 mm; Schlammteil: 0,063 bis 2 mm) in doppeltlogarithmischem Maßstab; waagrecht: „Phi-Skala“ (2 n [mm]; n: Exponent zur Basis 2), senkrecht: kumulative Gewichtsprozente.

Abb. 6: Konzentrationen an Eisen(III) in Festphase, als Balkendarstellung; schwarze Balken: gesamtes, für eine Reduktion zu Fe(II) verfügbares Eisen(III), extrahiert mit Ti(III)-EDTA; graue Balken: amorphes, für eine Reduktion zu Fe(II) verfügbares Eisen(III), extrahiert mit Ascorbat; Mittelwerte von mindestens 6 Messungen über die Länge des Bohrkerns von 2 m (AMIRBAHMAN et al. 1998).

T. Baumberger und S. Latifi, durchgeführt. Seitens der EAWAG wurden die Bohrarbeiten und Probennahmen durch Peter Huggenberger, Aria Amirbahman, Hans-Rudolf Zweifel und René Schoenenberger begleitet. Die Korngrößenverteilungen der Materialproben wurden durch die Eidgenössische Materialprüfanstalt (EMPA, Siebteil) und durch Ingrid Holderegger (EAWAG, Schlammteil) gemessen. Das Manuskript wurde von H.R. Zweifel verbessert. Die englische Zusammenfassung wurde von C. Annette Johnson korrigiert. Allen beteiligten Personen danken wir für ihren Einsatz. Für wertvolle Diskussionen dankt E.H. der Leiterin des FoSP-Teilprojekts, C.A. Johnson.

Literatur

- AMIRBAHMAN, A., SCHOENENBERGER, R., JOHNSON, C.A., SIGG, L. (1998): Aqueous and solid phase biogeochemistry of a calcareous aquifer system downgradient from a municipal solid waste landfill (Winterthur, Switzerland).- *Environ. Sci. Technol.* **32**(13): 1933–1940.
- BUWAL (1994): Altlastenkonzept für die Schweiz.- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt **200**.
- BUWAL (1997): Erläuterungen zur Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV), Mai 1997; Eidg. Departement des Innern.
- CASATI, A. (1959): Die Durchlässigkeit kiesiger Böden.- *Monatsbull. SVGW* **39**(6): 120–126.
- HOFER, M., AESCHBACH-HERTIG, W., BEYERLE, U., HADERLEIN, S.B., HOEHN, E., HOFSTETTER, TH., IMBODEN, D.M., JOHNSON, C.A., KIPFER, R., ULRICH, A., VITVAR, T. (1997): Tracers as essential tools for the investigation of physical processes in environmental systems.- *Chimia* **51**(12): 941–946.
- HUGGENBERGER, P., DEIACO, R., ZWEIFEL, H.-R., AMMANN, A., ULRICH, A. (1998): Optimising observation wells for process studies of old contaminated sites by combining geophysical, hydrogeological and geochemical methods (in Vorb.).
- JOHNSON, C.A., HOEHN, E. (1997): Auswirkungen von Altdeponien auf das Grundwasser.- *EAWAG-News* **44D**: 12–17.
- KÖRNER, H. (1957): Prüfung der Durchlässigkeit von Lockergesteinsinjektionen im Bauzustand.- *Wasserwirtschaft* **47**(8): 199–204.
- PETER, A. (1997): Deponie Riet, Modellierung der stationären Grundwasserströmung mit ASM – unveröff. Praktikumsarb., Univ. Freiburg i.Brsg./EAWAG.
- SIMMLER, M. (1993): Deponie Riet, Betrachtungen zur Langzeitsicherheit – unveröff. Dipl.arb., Abt. X, ETHZ/EAWAG.
- STADT WINTERTHUR (1996): Deponie Riet, Jahresbericht (unveröff.).