

Anmerkungen zum Einfluss von dichtebeeinflussten Grundwasserströmungen im Bereich von Altlasten

Christian A. Gillbricht
Hydrogeologisches Büro
Christian A. Gillbricht, Hamburg
CAGsoff@CAGsoff.com

CONSULAQUA Hamburg

Kai-Justin Radmann
CONSULAQUA Hamburg Beratungs-
gesellschaft mbH, Hamburg
KRadmann@consulaqua.de

Hans Wirth
Freie und Hansestadt Hamburg,
Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt
Hans.Wirth@bsu.hamburg.de

Zusammenfassung

Seit Beginn der systematischen Untersuchung von Altlasten ist an vielen Standorten, insbesondere Altablagerungen, der Einfluss von dichtebeeinflussten Grundwasserströmungen für die Ausbreitung von Schadstoffen festgestellt worden. Schon Dichtedifferenzen in einer Größenordnung von 1 g/l können unter geeigneten Randbedingungen derartige Strömungen auslösen. Dieses Phänomen wird jedoch nicht systematisch in den Konzepten zur Erkundung und Bewertung von Altlasten berücksichtigt, da es einerseits nur schlecht berechenbar und damit prognostizierbar ist, andererseits aus diesem Grund auch nur selten in der einschlägigen Fachliteratur behandelt wird. Eine erste Abschätzung der Relevanz des Phänomens für einen Standort lässt sich mit einfachen Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und der empirischen Schätzformel nach OOSTROM et al. (1992b) erreichen.

Abstract

Since the beginning of systematic investigation of contaminated sites, especially landfills, the influence of density dependent water movement on contaminant behavior in groundwater has been noted. For favourable geological and hydraulic boundary conditions density differences as little as 1 g/l suffice for the onset of this type of movement. The phenomenon is not taken into account on a regular basis because on one hand it is not easily computed and on the other hand there is little information on it given in the technical literature. A simple check for the relevance of the phenomenon for a site can be found using conductivity measurements and the empirical rule by OOSTROM et al. (1992b).

Problemstellung

Bei der Erkundung von Altlastverdachtsflächen hinsichtlich einer möglichen Verunreinigung des Grundwassers wird regelmäßig von einer Einmischung von Sickerwasser in den Grundwasserkörper ausgegangen, bei der Dichteunterschiede keinen oder nur einen untergeordneten Einfluss auf die Ausbreitungsvorgänge haben. Aufbauend auf dieser Grundannahme werden im unmittelbaren Abstrom von Altlastverdachtsflächen Erkundungen durchgeführt, bei denen entweder Grundwasserbeschaffenheitsmessstellen (GWBM) in vollkommener Bauweise bis zum ersten Grundwasserstauhorizont oder unvollkommene GWBM mit Filterstellungen im Bereich der freien Grundwasserberfläche bzw. im höchsten Teil des 1. Grundwasserleiters (GWL) errichtet werden. In neuerer Zeit werden außerdem zunehmend Probenahmen mit Direct-Push-Verfahren eingesetzt, die entweder planmäßig oder bedingt durch die technisch erreichbaren Sondierertiefen nur den höheren Teil des GWL erfassen.

Während beim Verdacht auf das Auftreten von nicht mischbaren organischen Flüssigkeiten höherer Dichte (dense non-aqueous phase liquids = DNAPL) regelmäßig die Erkundung bis zur Sohle des 1. GWL praktiziert wird, findet eine systematische Berücksichtigung der Möglichkeit eines Absinkens von mischbaren wässrigen Flüssigkeiten höherer Dichte (dense aqueous phase liquids = DAPL) nicht statt (SIMMONS, 2005). Es besteht daher die Gefahr, dass erhebliche Verunreinigungen des Grundwassers im Umfeld von Altlasten nicht erkannt werden und sich damit weiter ausbreiten können.

Stand des Wissens

Seit Beginn der systematischen Untersuchung von Altlasten in den 1970er Jahren ist an vielen Standorten, insbesondere Altablagerungen, der Einfluss von dichtebeeinflussten Grundwasserströmungen für die Ausbreitung von Schadstoffen festgestellt worden (KIMMEL & BRAIDS, 1980). Qualitative Beschreibungen finden sich nur vereinzelt im Fachschrifttum (z. B. BOCK, 1997; CHRISTENSEN et al., 2001) oder in nachrangigen Medien bzw. „grauer“ Literatur. Auch in zusammenfassenden Lehr- und Handbüchern gibt es nur wenige Hinweise.

Der Einfluss von Dichteeffekten ist im Labormaßstab Gegenstand einiger experimenteller Untersuchungen gewesen (SCHINCARIOL & SCHWARTZ, 1990; OOSTROM et al., 1992a, b; ISTOK & HUMPHREY, 1995; OSWALD, 1998). Im Feldmaßstab sind Dichteeffekte nicht systematisch untersucht worden. Sie wurden jedoch im Rahmen von Tracerexperimenten als Störinflüsse identifiziert und in der Auswertung berücksichtigt (LEBLANC et al., 1991; BOGGS et al., 1992; JENSEN et al., 1993; VEREECKEN et al., 2000).

Bei den genannten Untersuchungen hat es sich gezeigt, dass unter realitätsnahen Randbedingungen dichtebeeinflusste Strömungen mit deutlicher Tiefenverlagerung mischbarer (wässriger) Phasen schon bei Dichteunterschieden in einer Größenordnung von 1 ‰ (1 g/l) auftreten können.

Identifizierung von Problemstandorten

Grundsätzlich können dichtebedingte Strömungen immer dann auftreten, wenn der Dichteunterschied zwischen dem eintretenden Sickerwasser und dem natürlichen Grundwasser groß ist im Vergleich zur natürlichen horizontalen Strömungsgeschwindigkeit. OOSTROM et al. (1992b) geben für den Übergang von stabilen zu instabilen DAPL in einem homogenen Medium als Kriterium an:

$$\pi = \frac{k_{fv} \cdot \Delta\rho / \rho_0}{i_0 \cdot k_{fh}} > 0,3 \quad [-]$$

mit

$\Delta\rho$: Dichtedifferenz zwischen DAPL und Umgebungswasser (kg/m³)

ρ_0 : Dichte des nicht beeinflussten Wassers (kg/m³)

k_{fh} : horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)

k_{fv} : vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)

i_0 : horizontaler Gradient (-)

Unabhängig von der Qualität dieses Kriteriums, das empirisch an Hand von Laborexperimenten ermittelt wurde, ist seine Übertragung auf Altlasten problematisch, da zwar der horizontale Gradient des Grundwasserpotenzials durch Messungen der Grundwasserstände abgeschätzt werden kann, die Dichte des Sickerwassers und der Anisotropiefaktor k_{fv}/k_{fh} dagegen im Regelfall aber nicht bekannt sind. Für Altablagerungen sind Dichten des Sickerwassers von 1,01 als typisch anzusehen. Im Bereich von industriellen Altstandorten können Dichten des Sickerwassers zwischen 1,0 und 1,3 auftreten. Die Entwicklung der dichtebedingten Strömungsprozesse kann bedingt durch Simulationen beschrieben werden (Abb. 1).

Für einen anisotropen GWL mit $k_{fv} = 10 \cdot k_{fh}$ ergibt sich im Bereich gängiger Grundwassergradienten bei Dichteunterschieden im Bereich unterhalb 0,01 eine Relevanz der dichtebedingten Strömungen in einem erheblichen Teil des praktischen Arbeitsbereichs (Abb. 2).

Eine Abschätzung des Anisotropiefaktors kann aus den Ergebnissen von Pumpversuchen erfolgen oder aus der Auswertung detaillierter Bohrprofilenaufnahmen (ENTENMANN, 1998).

Eine erste Abschätzung der Dichte eines Sickerwassers bzw. eines oberflächennahen Grundwassers ist über die Lösungskonzentration aus der elektrischen Leitfähigkeit möglich:

$$c(\kappa) = A \cdot \kappa \quad [mg/l]$$

mit

κ : elektrische Leitfähigkeit (µS/cm)

A: Proportionalitätskonstante je nach Wassertyp im Bereich 0,54 bis 0,96, überwiegend im Bereich 0,55 bis 0,75 (HEM, 1985)

Diese Betrachtung schließt organische Schwerphasen (DNAPL) aus. Eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit um 1.000 µS/cm kann als erster Anhalt für eine relevante Dichtedifferenz gelten.

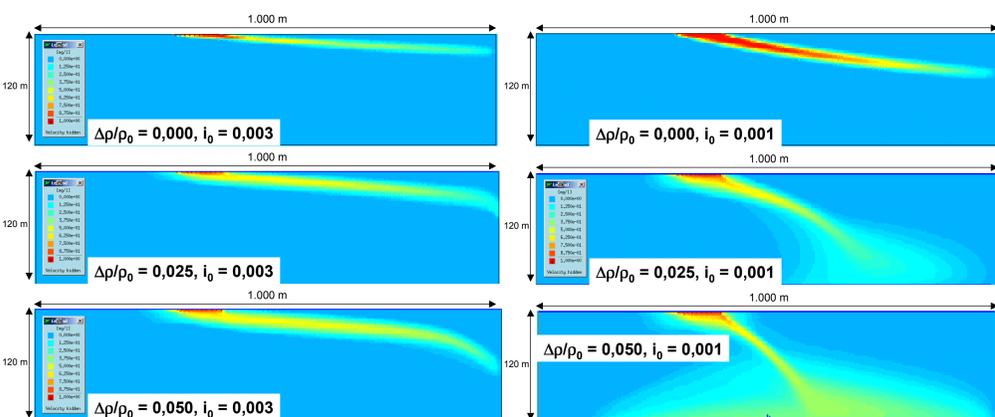


Abb. 1: Dichtebedingte Strömungsprozesse in einem homogenen isotropen Grundwasserleiter (Simulation)

Stabilitätsdiagramm nach OOSTROM et al., 1992b

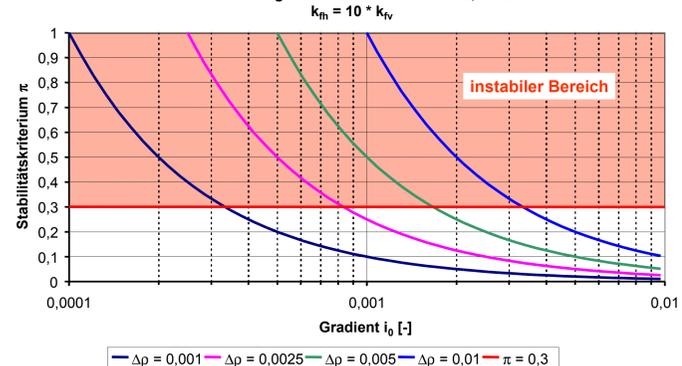


Abb. 2: Anwendung des Kriteriums nach OOSTROM et al. (1992b) auf praxisrelevante Sickerwasserdichten und Grundwassergradienten

Beispiel

Bei einer Altablagerung in Hamburg ist ein Austrag von Deponiesickerwasser in einen mächtigen Grundwasserleiter (pleistozäne Rinne) nachgewiesen worden. Bei der Erkundung wurden Direct-Push-Sondierungen mit einer maximalen Tiefe von 20 m unter GOK eingesetzt und die entnommenen Wasserproben ausschließlich auf leicht flüchtige Schadstoffe (BTEX, LCKW) untersucht. Im Bereich der Rinne außerhalb des Deponiekörpers wurden bei dieser Vorgehensweise keine Verunreinigungen nachgewiesen. Untersuchungen an einer Messstelle mit langer Filterstrecke innerhalb der Rinne (GWBM 8366) zeigten Spuren von Schadstoffen (BTEX, PAK). Eine Vermessung der elektrischen Leitfähigkeit ergab oberflächennah Werte im Bereich anthropogen unbeeinflusster Wasser, am unteren Ende der Filterstrecke (Sohlschicht des Wasserleiters nicht erhöht) deutlich erhöhte Leitfähigkeiten, die sich aber nach im Rahmen des geogen Möglichen bewegen. Eine daraufhin veranlasste tiefenorientierte Untersuchung an GWBM 8366 und anschließende Errichtung weiterer GWBM zeigte ein Deponiesickerwasser, das auf bindigen Zwischenschichten (Geschiebemergeln) innerhalb des Grundwasserleiters gestaut wird. Das nach den elektrischen Vermessungen unauffällige oberflächennahe Grundwasser zeigt geochemische Auffälligkeiten, die auf eine anthropogene Beeinflussung hinweisen (Abb. 3).

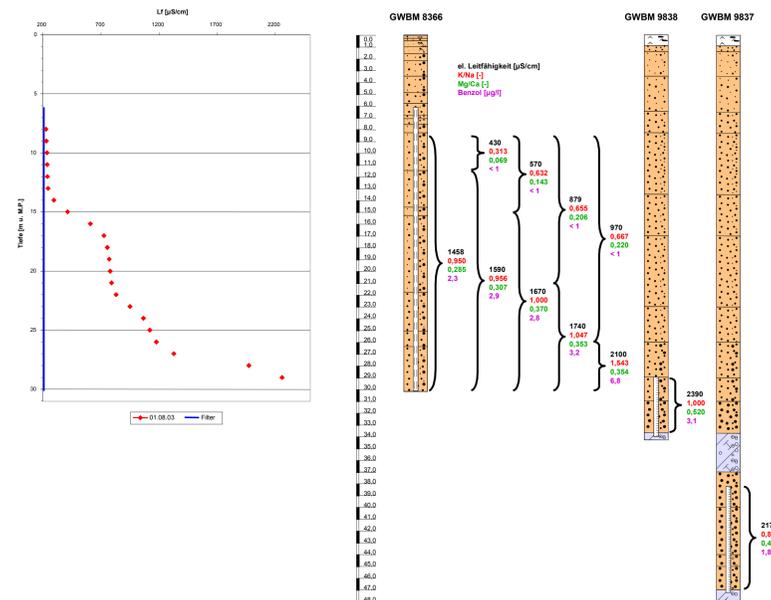


Abb. 3: Dichteinduzierte Schadstoffausbreitung im Bereich einer Altablagerung. Vergleich einer Vermessung der elektrischen Leitfähigkeit mit tiefenorientiert gewonnenen Grundwasserproben

Fazit

Bei der Erkundung von (möglichen) Grundwasserverunreinigungen im Umfeld von Altlasten ist auch beim Fehlen dichter organischer Phasen (DNAPL) regelmäßig die Möglichkeit dichteinduzierter Strömungen in Betracht zu ziehen. Dieser Effekt entzieht sich in den meisten Fällen einer Berechnung (Modellierung) und ist daher in erster Linie empirisch durch entsprechende Untersuchungen zu überprüfen. Eine Nichtbeachtung kann zu einer unzureichenden Erkundung des Schadens und damit einer fehlerhaften Bewertung der Gefährsituation führen.

Literatur

BOCK, W. (1997): Grundwasserbelastung und Ionenaustausch im Unterstrom einer Abfalldeponie. - Zeitschrift für angewandte Geologie, 43: 159 - 166; Stuttgart
BOGGS, J.M.; YOUNG, S.C.; BEARD, L.M.; GEHAR, L.W.; REHFELD, K.R. & ADAMS, E.E. (1992): Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer. 1. Overview and site description. - Water resources research, 28: 3281 - 3291; Washington, D.C.
CHRISTENSEN, T.H.; KILDESEN, P.; BIESE, L.; JENSEN, D.L.; CHRISTENSEN, J.B.; BAIN, A.; ALBRECHTSEN, H.-J. & HEDEN, G. (2001): Biogeochemistry of landfill leachate plumes. - Applied geochemistry, 16: 659 - 718; Oxford
ENTENMANN, W. (1998): Hydrogeologische Untersuchungsmethoden von Altlasten. - Springer, XII + 373 S.; Berlin
HEM, J.D. (1985): Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3rd edition - U.S. Geological Survey Water-supply paper, 2254: XII + 263; Washington, D.C.
ISTOK, J.D. & HUMPHREY, M.D. (1995): Laboratory investigation of buoyancy-induced flow (plume sinking) during two-well tracer tests. - Ground water, 33: 997 - 1004; Dublin, OH
JENSEN, K.H.; BIESE, K. & BIESE, P.L. (1993): Large-scale dispersion experiments in a sandy aquifer in Denmark: Observed tracer movements and numerical analyses. - Water resources research, 29: 673 - 696; Washington, D.C.
KIMMEL, G.E. & BRAIDS, O.C. (1980): Leachate plumes in ground water from Babylon and Islip landfills, Long Island, New York. - U.S. Geological Survey Professional paper, 1085: 38 S.; Washington, D.C.
LEBLANC, D.R.; GARABEDIAN, S.P.; HESS, K.M.; GRIFFIN, L.W.; GUYOR, R.W.; STOLLING, K.G. & WOOD, W.W. (1991): Large-scale natural gradient tracer test in sand and gravel, Cape Cod, Massachusetts. 1. Experimental design and observed tracer movement. - Water resources research, 27: 895 - 910; Washington, D.C.
OOSTROM, M.; DANIE, J.H.; GÖVÉN, O. & HAWORTH, J.S. (1992a): Experimental investigation of dense solute plumes in an unconfined aquifer model. - Water resources research, 28: 2315 - 2326; Washington, D.C.
OOSTROM, M.; HAWORTH, J.S.; DANIE, J.H. & GÖVÉN, O. (1992b): Behavior of dense aqueous phase leachate plumes in homogeneous porous media. - Water resources research, 28: 2123 - 2134; Washington, D.C.
OSWALD, S. (1998): Dichteströmungen in porösen Medien. Dreidimensionale Experimente und Modellierung. - Dissertation ETH Zürich, 12812: III + 111 S.; Zürich
SCHINCARIOL, R.A. & SCHWARTZ, F.W. (1990): An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media. - Water resources research, 26: 2317 - 2329; Washington, D.C.
SIMMONS, C.T. (2005): Variable density groundwater flow: From current challenges to future possibilities. - Hydrogeology journal, 13: 116 - 119; Berlin
VEREECKEN, H.; DOOGHE, J.; HADJILAF, H.; JAKEL, U.; HADJILAF, U.; NEUNER, O.; SCHWARTZ, H. & SIMMONS, R. (2000): Analysis of solute transport in a heterogeneous aquifer: the Krauthausen field experiment. - Journal of contaminant hydrology, 45: 329 - 358; Amsterdam