

BIOLOGISCHE *IN-SITU*-SANIERUNG MINERALÖL-KONTAMINierter BÖDEN UND GRUNDWASSERLEITER

Eine Forschergruppe vom Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich konnte zeigen, dass die biologische Sanierung ölverschmutzter Zonen an Ort und Stelle eine effiziente und kostengünstige Alternative zu den traditionellen Sanierungstechniken darstellt. Bei dieser «sanften» Methode geht es im wesentlichen darum, die bereits vorhandene mikrobielle Aktivität im Untergrund durch Zugabe von Oxidationsmitteln und Nährstoffen zu fördern. Solche biologische Sanierungsverfahren sind allerdings nur dann erfolgreich, wenn die komplexen physikalischen und chemischen Rahmenbedingungen im Untergrund miteinbezogen werden.

Laut einer Studie des BUWAL gibt es in der Schweiz 40 000 altlastverdächtige Flächen; 500 davon weisen ein grosses Gefährdungspotential auf und müssen in den nächsten Jahren saniert werden. Traditionelle Sanierungsmethoden – das Ausbaggern und Deponieren oder Verbrennen des kontaminierten Bodens – sind teure Problemverschiebungen. In den letzten Jahren wurde deshalb intensiv nach alternativen Verfahren gesucht. Im Falle von Mineralöl-kontaminierten Böden und Grundwasserleitern erscheinen biologische Sanierungen besonders attraktiv, weil dabei im Idealfall die Schadstoffe direkt im Erdreich oder im Grundwasser mit Hilfe von Mikroorganismen mineralisiert werden und der Boden nicht verloren geht.

In jedem Krümel Erde leben im Schnitt über 10^6 Mikroorganismen. Diese katalysieren geochemische Prozesse (globale C-, N-, P-Kreisläufe); mit ihren vielfältigen Stoffwechselprozessen bauen sie organische Substanz auf, um und ab. Neben physiologischen Verbindungen können die Mikroorganismen auch viele Schadstoffe wie Mineralölkomponenten und chlorierte Lösungsmittel mineralisieren. Gegen Schwermetallbelastungen sind sie allerdings machtlos. Mineralölkomponenten (z. B. n-Alkane und aromatische Kohlenwasserstoffe) werden bevorzugt unter aeroben Bedingungen mikrobiell abgebaut. Seit einigen Jahren ist bekannt, dass diese Substanzen auch durch Zugabe von alternativen Oxidationsmitteln (z. B. NO_3^- , SEYFRIED et al., 1994) mineralisiert werden können.

Oft sind aber Schadstoffe an Oberflächen angelagert oder in Porenräume eingeschlossen und damit für einen mikrobiellen Abbau kaum verfügbar. Die Abbaugeschwindigkeit wird somit nicht nur durch die enzymatische Aktivität der Mikroorganismen bestimmt, sondern auch durch die Kinetik der Desorption und Diffusion. Biologische Sanierungsver-

fahren, die sich lediglich darauf beschränken, die mikrobielle Aktivität zu stimulieren, und somit die Komplexität der physikalischen wie chemischen Rahmenbedingungen und Prozesse im Untergrund vernachlässigen, scheitern gewöhnlich.

Es wird heute vermutet, dass weniger als 5% sämtlicher Mikroorganismen bekannt sind. Die Technologie der biologischen Sanierung von Boden und Grundwasser steht folglich vor der Tatsache, mit einem Werkzeug – eben Mikroorganismen – zu arbeiten, das alles andere als genau definiert ist. Dieselbe Situation ist aber auch im Bereich der Abwasserreinigungstechnologie gegeben, und da sind die Erfolge unbestritten.

Analog zur Abwasserreinigung geht es bei der biologischen Boden- und Grundwassersanierung unter anderem darum, die bereits latent vorhandene mikrobielle Aktivität mit verfahrenstechnischen Methoden zu fördern. Dies geschieht beispielsweise durch Zugabe von Oxidationsmitteln, Nährstoffen und Spurenelementen, von Kohlensäure oder Kalk (um einen optimalen Säuregehalt einzustellen) oder von Tensiden, die bestimmte Schadstoffe besser für den Abbau verfügbar machen. Direkte Eingriffe in die ohnehin weitgehend unbekannt mikrobiellen Populationen in Kläranlagen, Böden und Grundwasserleitern – etwa durch gezieltes Beimpfen mit standortfremden und im Labor vorgezüchteten Kulturen – steigerten bisher die Reinigungsleistung kaum.

Am Beispiel eines Grundwasserleiters, der über längere Zeit hinweg durch eine lecke Tankstelle mit insgesamt 10 000 Liter Dieselöl kontaminiert wurde, untersuchte eine Arbeitsgruppe des Fachbereiches Bodenbiologie vom Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich, was die «sanfte» Sanierung leisten kann (ZEYER, 1994; HUNKELER et al., 1995). Die Studie erfolgte im Rahmen des vom Schweizerischen Nationalfonds durchgeführten Schwerpunktprogramms «Umwelt».

Feldstudien

Nach der Entdeckung der Kontamination 1988 wurde auf Anordnung der kantonalen Behörden als Sofortmassnahme der am stärksten verschmutzte Bereich ausgehoben und das auf dem Grundwasserspiegel schwimmende Öl abgesogen. Anschliessend installierte man 22 Beobachtungsrohre und erfasste die kontaminierte Zone sowohl hydrogeologisch als auch chemisch-analytisch so gut wie möglich. Durch Zugabe von Oxidationsmitteln (O_2 und NO_3^-) und Nährstoffen (NH_4^+ und PO_4^{3-}) versuchten die Fachleute, die mikrobielle Aktivität im Untergrund zu stimulieren. Die Idee wurde von den

kantonalen Behörden in Zusammenarbeit mit einem geologischen Büro entwickelt. Das Konzept wurde bautechnisch umgesetzt, indem kontaminiertes Grundwasser an die Oberfläche gepumpt, durch einen Ölabscheider geleitet, über eine wasserfallähnliche Kaskade belüftet, mit NO_3^- (1.6 mM), NH_4^+ und PO_4^{3-} (je 0.1 mM) angereichert und schliesslich wieder in den Untergrund zurückgegeben wurde (Abb.).



Einfache und dennoch sehr effiziente Dosieranlage für Nährstoffe und Oxidationsmittel. Rechts oben: Ölabscheider; links: Kaskade zur Belüftung des Grundwassers; rechts unten: Tank mit Nährstoffen und Oxidationsmitteln (Bild: Josef Zeyer, ETH Zürich).

Den Fortschritt der Sanierung verfolgten die Forscher, indem sie periodisch an allen Beobachtungsrohren Grundwasserproben entnahmen und chemisch analysierten. Die Daten zeigten, dass die zufließenden Oxidationsmittel im Untergrund vollständig verbraucht wurden und die Konzentrationen von Dieselölkomponenten kontinuierlich sanken. Zudem konnte in der kontaminierten Zone bei mehreren Beobachtungsrohren Methan (>0.5 mM) nachgewiesen werden. Dieses wurde offensichtlich in Zonen gebildet, die nicht ausreichend mit O_2 und NO_3^- versorgt wurden.

Simulationen im Labor

Die Rekonstruktion von mikrobiellen, geochemischen und physikalischen Prozessen aufgrund von Felddaten ist äusserst schwierig. Die ETH-Wissenschaftler versuchten deshalb, die in den kontaminierten Zonen vermuteten Prozesse in Grundwasserkolonnen im Labor unter definierten Bedingungen zu simulieren. Dazu füllten sie Material aus der kontaminierten und mikrobiologisch aktiven Zone in Glasäulen ein. Die Kolonnen wurden mit einem synthetisch zusammengesetzten Grundwasser betrieben. Mit einigen ^{14}C -markierten Kohlenwasserstoffen liess sich die Minerali-

sierung zu $^{14}\text{CO}_2$ sowohl unter aeroben als auch unter denitrifizierenden Bedingungen eindeutig nachweisen. Allerdings waren die Umsatzraten unter denitrifizierenden Bedingungen deutlich geringer als unter aeroben Bedingungen. In den Kolonnen konnten auch einige für die *In-situ*-Sanierung essentielle Fragen studiert werden: So etwa die Dosierung der Oxidationsmittel und Nährstoffe oder die Problematik der Bioverfügbarkeit.

Um die biologische Sanierung *in situ* qualitativ zu überprüfen, erstellten die Forscher Elektronen- und Alkalinitätsbilanzen und bestimmten die Verhältnisse von $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Die Ergebnisse zeigen, dass die Mineralisierung von Dieselöl im Grundwasser mit einer Reihe von mikrobiellen, geochemischen und physikalischen Prozessen gekoppelt ist. Nur wenn diese Prozesse qualitativ und quantitativ erfasst worden sind, kann die biologische *In-situ*-Sanierung effizient gesteuert werden. Dies bedingt ein sinnvolles chemisches Monitoring in der kontaminierten Zone und begleitende Simulationen im Labor.

Literatur

- HUNKELER, D., HÖHENER, P., HÄNER, A., BREGNARD, R. & ZEYER, J. 1995. Quantification of hydrocarbon mineralization in a diesel fuel contaminated aquifer treated by *in situ* bioremediation. – Proceedings of the international conference on «Groundwater Quality: Remediation and Protection», Prague, May 1995, IAHS Press, Wallingford UK.
- SEYFRIED, B., GLOD, G., SCHOCHER, R., TSCHECH, A. & ZEYER, J. 1994. Initial reactions in the anaerobic oxidation of toluene and *m*-xylene by denitrifying bacteria. - Appl. Environ. Microbiol. 60, 4047–4052.
- ZEYER, J. 1994. Biologische *In-situ*-Sanierung eines dieselölkontaminierten Grundwasserleiters: Feldstudien und Laboratoriumsexperimente. – Symposiumsband «Umwelt-Biotechnologie» pp. 40–45, Bochum, März 1994.

VERBESSERUNGEN IN DER HALTUNG VON VERSUCHSTIEREN

Um die Haltungsnormen für Versuchstiere zu verbessern, braucht es differenzierte und reproduzierbare ethologische Kenntnisse der Labortierarten und -stämme. Diese lassen sich nur mit einem zoologischen Forschungsansatz – und nicht intuitiv-empirisch – gewinnen, davon ist Markus Stauffacher überzeugt. Der Verhaltenswissenschaftler an der ETH Zürich und Lehrbeauftragte der Universität Zürich erhielt für seine Arbeiten auf dem Gebiet der tierschutzorientierten

Labortierethologie den deutschen Felix-Wankel-Tierschutz-Forschungspreis 1994.

Im Zusammenhang mit Tierversuchen haben die 3 R, «replace, reduce und refine» eine wichtige Bedeutung erlangt. Lange Zeit stand der Ersatz von Tierversuchen durch alternative Methoden sowie die Verminderung der in Versuchen eingesetzten Tierzahlen im Vordergrund. Weniger offensichtlich sind die Erfolge beim Verbessern von Tierhaltung und Betreuung. Gerade dieser Punkt ist jedoch für den Tierschutz von grosser Bedeutung. Denn die Zeit vor und nach dem Experiment kann für das Tier unter Umständen grössere und längerfristige Einschränkungen bringen als der Versuch selbst.

Als tierschutzorientierter Ethologe beschäftigt sich Markus Stauffacher vom Institut für Nutztierwissenschaften, Physiologie und Tierhaltung der ETH Zürich mit den Wechselbeziehungen zwischen Befinden, Verhalten, Körperfunktionen und Haltungsumgebung (STAUFFACHER, 1993a). Während Verhalten und Haltungsumgebung direkt erfassbar sind, kann das Befinden nur über Analogien und Homologien zum eigenen Erleben geschlossen werden. «Solange Tierschutz nicht nur das ethisch-moralische Gewissen des Menschen befriedigen, sondern primär dem Tier zugute kommen soll, müssen an die Tiere diejenigen Fragen gestellt werden, die sie auch eindeutig beantworten können», fordert Stauffacher. So sind etwa Störungen des Verhaltens oder morphologische Schäden im Gegensatz zur Befindlichkeit naturwissenschaftlich erfassbare und quantifizierbare Parameter.

In der tierschutzorientierten Labortierethologie überprüfen die Forscher und Forscherinnen einerseits praxisübliche Haltungssysteme auf ihre Tiergerechtheit und beurteilen sie zoologisch. Zum andern leiten sie aus der Kenntnis der Umgebungsansprüche der Labortiere tiergerechte Haltungskonzepte ab, die dann zu neuen praxistauglichen Haltungssystemen und verbesserten Haltungsnormen führen können. Die tierschutzorientierte Labortierethologie versteht sich als Integrationsfach verschiedener zoologischer und veterinärmedizinischer Disziplinen.

Immer ein Kompromiss

Jede Tiernutzung, bei der Tiere in menschlicher Obhut gehalten werden, bedeutet für das Tier eine erhebliche Einschränkung. Praktische Tierschutzmassnahmen beruhen immer auf einem Kompromiss zwischen tierbezogenen Bedürfnissen und Zwängen der menschenbezogenen wirtschaftlichen und politischen Realität. Eine Haltungsform ist dann «tiergerecht», wenn die Anpassungsfähigkeit des Individuums nicht

überfordert wird. Überforderte Anpassungsfähigkeit äussert sich in Störungen des Verhaltens, in chronischem Stress, in morphologischen Schäden und in somatischen Dysfunktionen.

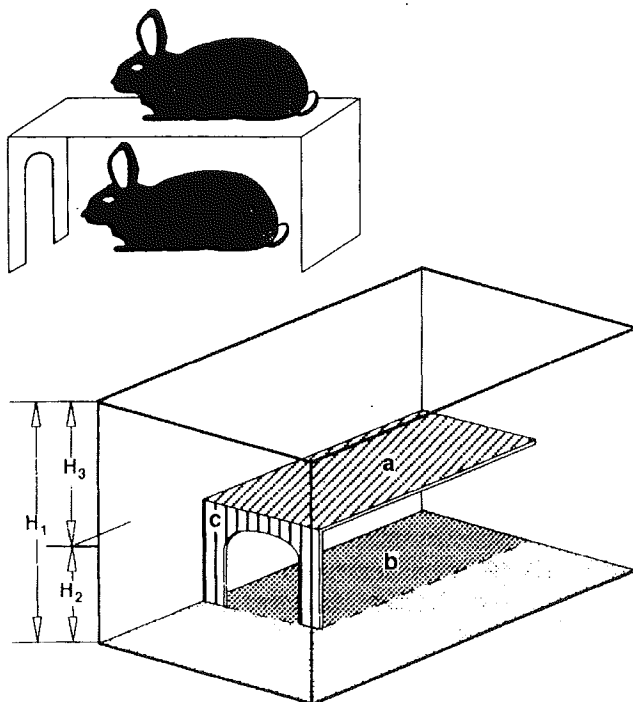
80–90% aller Versuchstiere sind Nagetiere. Hier besteht auch der grösste Forschungsbedarf, denn zur Zeit ist noch nicht klar, wo genau welche Probleme bei der praxisüblichen Standardhaltung liegen. Wie problematisch es sein kann, die Tiergerechtheit intuitiv-empirisch zu beurteilen, zeigt Markus Stauffacher an folgendem Beispiel. Vor 4 Jahren kam eine Studie zum Schluss, dass Ratten in Käfigen zu halten sind, deren Höhe das gesetzliche Minimum von 14 cm deutlich übersteigt, damit sich die Tiere aufrichten können. Käfigherstellerfirmen haben schnell reagiert und bieten heute unter dem Hinweis auf Tiergerechtheit erhöhte Kunststoffwannen bzw. erhöhte Gitterdeckel an. Aus ethologischer Sicht muss man sich allerdings fragen, weshalb sich die Ratten in Kunststoffkäfigen so häufig aufrichten. Dies umso mehr, als sich die Tiere unter reichhaltig strukturierten, extensiven Haltungsbedingungen eher selten aufrichten. Sie nehmen diese Stellung bei sozialen Auseinandersetzungen ein sowie dann, wenn sie vermutlich etwas hören, ohne die Lautquelle vom Boden aus orten zu können. Unter diesem Aspekt ist es naheliegend, dass sich Ratten in Kunststoffwannen darum so häufig aufrichten, weil sie nur über den Gitterdeckel olfaktorisch und akustisch orten können. Das tierschutzrelevante Problem dürfte weniger bei der Käfighöhe als vielmehr am geschlossenen Kunststoffkäfig liegen. Erfasst man eine Verhaltensweise losgelöst vom kausalen und funktionalen Kontext, so lässt sich nichts über deren Bedeutung für das Tier aussagen.

Fortschritt bei den Laborkaninchen

Der von Markus Stauffacher geforderte zoologische Forschungsansatz geht zwar wie der intuitiv-empirische Ansatz vom Wissen um die Probleme in der praxisüblichen Standardhaltung aus. Als Bezugssystem dient hingegen eine reichhaltig strukturierte, extensive räumliche und soziale Umgebung. Mit diesem Vorgehen hat STAUFFACHER (1993b) bisher Konzepte für die Haltung von Laborkaninchen in Gruppen sowie Paarhaltung von Kaninchenzibben im strukturierten Käfig entwickelt. Beide Haltungssysteme werden inzwischen in der Schweiz verbreitet und erfolgreich von Hochschulen und Industrie eingesetzt.

Setzt man Kaninchen in eine naturnahe Umgebung aus, so sammeln sie sich zum Ruhen unter einem Busch. Dieser zeichnet sich gegenüber dem umliegenden offenen Gebiet

durch folgende Eigenschaften aus: Lichtgradient hell-dunkel, Deckung gegen oben = Schatten und Schutz vor Luftraubfeinden, Sicht über das Gebiet = Schutz vor Bodenraubfeinden und Kontrolle des sozialen Geschehens. Zudem ist dort die Bodenfeuchtigkeit gering, und es existieren Strukturen, an die sich die Kaninchen anschmiegen können. Alle weiteren Eigenschaften des Busches und der unmittelbaren Umgebung scheinen für das Kaninchen unwesentlich zu sein. Die oben aufgeführten Bedürfnisse lassen sich zum Beispiel durch die in der Abb. dargestellte Konstruktion substituieren. Der portalartige Durchschlupf auf der linken Seite nimmt noch einen andern Aspekt auf: Unter naturnahen Bedingungen fliehen Kaninchen bei Störungen häufig in selbstgegrabene Erdröhren.



Strukturierter Käfig «Typ Roche 1993» mit erhöhter Ebene (a: 60 x 30 cm) und Rückzugsbereich (b) mit seitlichem Einschlupf (c). Bodengrundfläche: 88 x 56 cm; H₁: 60 cm; H₂: 25 cm; H₃: 35 cm (Illustration: Markus Stauffacher, ETH Zürich).

Sozial lebende Tiere – und dazu gehören fast alle Labortiere – interagieren häufig, aber nicht zufällig mit Artgenossen. Sie sollten deshalb grundsätzlich nicht allein gehalten werden. Ein Sozialpartner bringt gerade in reizarmer Umgebung Abwechslung, Beschäftigung und vermutlich auch etwas «Sicherheit» und «Geborgenheit». Im Gegensatz zu unbelebten Objekten schafft er immer wieder neue, unvorhersehbare Situationen, auf die ein Tier sich einstellen und

reagieren muss. Voraussetzung für ein erfolgreiches Zusammenleben ist, dass die Umgebung so strukturiert ist, dass sich die Tiere bei Bedarf meiden und Kontakte immer wieder neu initiieren können. Damit sich ein ethologisches Haltungskonzept in der Praxis durchsetzen kann, muss es schliesslich in ein für den Menschen handhabbares Haltungssystem umgesetzt werden. Hier den Ansprüchen des Menschen – von der Tierbetreuung bis zur Forschungsleitung – gerecht zu werden, ist wohl der schwierigste Schritt.

Literatur

STAUFFACHER, M. 1993a. Tierschutzorientierte Labortierethologie in der Tiermedizin und in der Versuchstierkunde – ein Beitrag zum Refinement bei der Haltung von und im Umgang mit Versuchstieren. In: «Alternativen zu Tierversuchen in Ausbildung, Qualitätskontrolle und Herz-Kreislauf-Forschung». H. SCHOEFFL, H. SPIELMANN, F.-P. GRUBER, B. KOIDL, CH.A. REINHARDT (Eds.), pp. 6–21. – Springer-Verlag, Wien, New York, 281 pp.

STAUFFACHER, M. 1993b. Refinement bei der Haltung von Laborkaninchen. Ein Beitrag zur Umsetzung von Tierschutzforderungen in die Praxis. – Der Tierschutzbeauftragte 3, 18–33.

SUSANNE HALLER-BREM