BIOLOGISCHE BODENREINIGUNG – VON DER FORSCHUNG IN DIE PRAXIS

Christian Löser, Heinz Seidel, Andreas Zehnsdorf, Petra Hoffmann, Ulrich Stottmeister

Der Boden ist ein nicht vermehrbarer und kaum erneuerbarer Rohstoff. Er ist Grundlage unserer Ernährung, aber auch ein vielschichtiges und komplexes Ökosystem mit zahlreichen Funktionen. Er speichert, filtert und puffert Wasser, liefert Nährstoffe, ist Bestandteil der Stoffkreisläufe, birgt Rohstoffe und dient der Pflanzen- und Tierwelt – letztlich auch dem Menschen – als Lebensgrundlage. Der Mensch nutzt und beansprucht den Boden auf vielfältige Weise. Wohnen, Industrieansiedlung, Landwirtschaft, Verkehr, Rohstoffabbau, Abfallentsorgung und Erholung können die Bodenfunktionen in kurzer Zeit zerstören.

Eine besondere Form der Belastung des Bodens sind Altlasten. Dazu zählen Gefahrenquellen, die in der Vergangenheit durch ungeordnete Abfallbeseitigung oder nachlässigen Umgang mit problematischen Stoffen, zum Beispiel auf Altstandorten der Industrie entstanden sind, dazu gehören aber auch Belastungen des Bodens durch Unfälle bei der Lagerung und dem Transport von Gefahrstoffen, Leckagen von Tanklagern oder Rohrleitungen. Um solche Böden wiedernutzbar zu machen, muss der Schadstoff beseitigt, der Boden saniert werden. Eine Möglichkeit ist die *in situ*-Sanierung, bei der der kontaminierte Boden im Untergrund verbleibt. Dieses Verfahren ist jedoch nicht immer anwendbar und noch mit zahlreichen Schwierigkeiten, wie Einstellung und Kontrolle optimaler Umweltbedingungen, unvollständige Abbauprozesse und Nachweis des Sanierungserfolges, verbunden.

Deshalb wird oft *ex situ* saniert, dass heißt, der kontaminierte Boden wird entnommen und über biologische, chemisch-physikalische oder thermische Reinigungsverfahren behandelt.

Bild 1: Mit verschiedenen Altlasten kontaminierte Böden vor ihrer ex situ-Sanierung (Foto: Norma Neuheiser)

Biologische Bodenreinigungsanlagen basieren auf der Fähigkeit von Mikroorganismen, Schadstoffe abzubauen. In einem praxisorientierten Forschungsprojekt, das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wurde, sollten Wege gefunden werden, das Leistungspotential adaptierter Mikroorganismen für den Schadstoffabbau über Steuerung der Milieubedingungen effektiver zu nutzen. Dazu wurde eine stillgelegte Silageanlage eines ehemaligen landwirtschaftlichen Betriebes zu einer nach dem Perkolationsprinzip arbeitenden Bodenreinigungsanlage umgebaut. Perkolationsprinzip bedeutet, dass Wasser im Kreislauf über einen Feststoff gerieselt wird. Dabei werden die Abbauprodukte mit dem Prozesswasser ausgetragen und gleichzeitig Nährstoffe, die die Mikroorganismen für ihr Wachstum benötigen, zugegeben.

Solche Perkolationssysteme sind zwar konstruktiv wesentlich aufwendiger als einfache Bodenmieten, bei denen der Boden in bestimmten Zeitabständen nur durchmischt und bestenfalls befeuchtet wird, aber mittels der Prozesssteuerung kann der Sanierungsverlauf

auf vielfältige Weise beeinflusst werden. Durch einen schnelleren Schadstoffabbau verkürzt sich die Behandlungsdauer, und ein entsprechend höherer Durchsatz an kontaminiertem Boden führt zu erheblichen Kostenreduzierungen. Das Projekt wurde gemeinsam vom Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle und der Bauer und Mourik Umwelttechnik GmbH&Co. bearbeitet.

Kohlenwasserstoffabbau bei periodischem aerob-anaerob-Wechsel

Mikroorganismen können durch eine zeitweilige Sauerstofflimitation Substrate schneller umsetzen und den dissimilativ, also durch Stoffwechsel unter Energiefreisetzung, umgesetzten Substratanteil erhöhen. Es wurde geprüft, ob diese in wässrigen Systemen beobachteten Effekte genutzt werden können, um in Kohlenwasserstoff-kontaminierten Böden den Schadstoffabbau zu beschleunigen und den Anteil der vollständig zu Kohlendioxid und Wasser mineralisierten Schadstoffe zu erhöhen. Dazu wurde der Schadstoffabbau im Boden bei periodischem aerob-anaerob-Wechsel mit dem Abbau unter rein aeroben Kultivierungsbedingungen verglichen.

Die Untersuchungen wurden an einem künstlich mit Dieselkraftstoff kontaminierten Boden in einem Perkolator durchgeführt. Ein Perkolator besteht aus einer Säule mit Siebeinsatz, in welchem der zu behandelnde Boden aufgenommen wird, und aus einem Rührreaktor mit dem Prozesswasser (Bild 2). Das Prozesswasser enthält die für das Wachstum der Mikroorganismen benötigten Nährstoffe und gegebenenfalls weitere Zusätze. Es wird über den Boden verregnet und läuft, wenn es durch den Boden gesickert ist, in den Rührreaktor zurück. Im Rührreaktor kann der pH-Wert auf einen konstanten Wert geregelt werden. Um die aeroben Bedingungen zu gewährleisten, wird ein Luftstrom durch die Anlage geleitet.

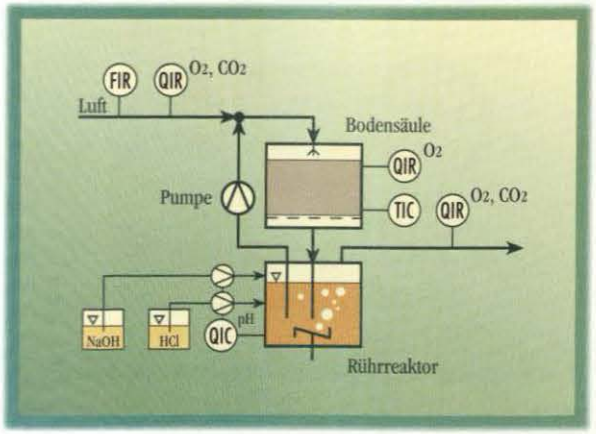


Bild 2: Schematische Darstellung einer Perkolator-Apparatur für Untersuchungen zum biologischen Schadstoffabbau in kontaminierten Böden

Um beim periodischen Wechsel der aeroben und anaeroben Phasen (4 Stunden aerobe und 2 Stunden anaerobe Bedingungen) einen schnellen Übergang zu anaeroben Bedingungen zu erreichen, wurde der Boden mit dem Prozesswasser geflutet. Der Luftstrom wurde in dieser Phase am Boden vorbeigeführt. Messungen der Sauerstoffkonzentration im wassergesättigten Boden zeigten, dass die angestrebten anaeroben Bedingungen nur dann erreicht wurden, solange ein intensiver Schadstoffabbau im Boden stattfand [1].

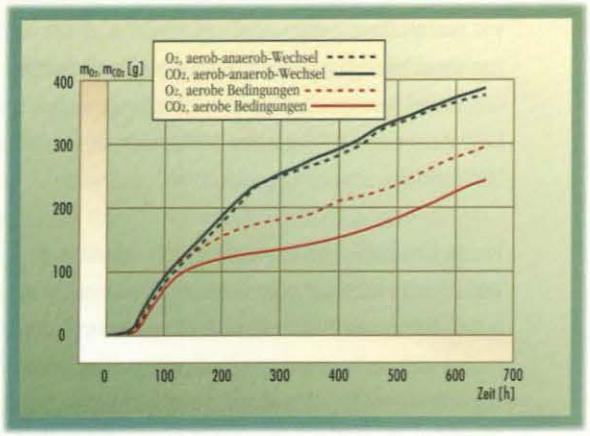


Bild 3: Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidbildung beim mikrobiellen Abbau von Dieselkraftstoff im Boden unter aeroben Bedingungen bzw. bei periodischem aerob-anaerob-Wechsel (anfängliche Schadstoffkonzentration = 3 Gramm Dieselkraftstoff pro Kilogramm Boden)

Der Mineralisierungsgrad der Kohlenwasserstoffe war bei periodischem aerob-anaerob-Wechsel wesentlich höher als unter rein aeroben Bedingungen. Erkennbar ist dies am höheren Sauerstoffverbrauch und der größeren Kohlendioxidbildung (Bild 3). Die stärkere Mineralisierung wurde nicht durch einen intensiveren Kohlenwasserstoffabbau (unter beiden Versuchsbedingungen etwa gleicher Schadstoffabbaugrad zum Versuchsende), sondern durch eine Erhöhung des dissimilativ umgesetzten Kohlenwasserstoffanteils verursacht. Eine Beschleunigung des Kohlenwasserstoffabbaus konnte durch den periodischen aerob-anaerob-Wechsel dagegen nicht erreicht werden [2].

Mangelnde Bioverfügbarkeit beim Schadstoffabbau im Boden

Obwohl die Kreislaufführung des Prozesswassers optimale Bedingungen für die Mikroorganismen im Boden hinsichtlich pH, Temperatur und mineralischer Nährstoffe gewährleistete, wurden die Diesel-Kohlenwasserstoffe innerhalb von 600 Stunden nur zu etwa 45 Prozent abgebaut. Der hohe Restschadstoffgehalt ist zum einen damit zu erklären, dass Dieselkraftstoff einen hohen Anteil mikrobiell schwer abbaubarer Verbindungen enthält. Zum anderen kann aber auch eine mangelnde Bioverfügbarkeit der Kohlenwasserstoffe im Boden für den hohen Restgehalt verantwortlich sein. Schadstoffe können so stark an Bodenpartikel sorbieren, dass sie für die Mikroorganismen nicht mehr zugänglich sind. Im allgemeinen ist die Bindung zwischen Schadstoff und Boden um so stärker, je höher der Gehalt an organischer Substanz und je größer der Feinkornanteil des Bodens ist. Der in den Untersuchungen verwendete Boden war aber annähernd organikfrei und enthielt auch nur einen vernachlässigbar geringen Anteil schluffig-toniger Bodenpartikel (quarzreicher Sand aus einer Kiesgrube bei Leipzig mit einem mittleren Partikeldurchmesser von 0,49 Millimetern).

Um die Ursache für den unvollständigen Kohlenwasserstoffabbau zu klären, wurden zunächst Abbauversuche mit n-Hexadekan- bzw. Phenanthren-kontaminiertem Boden nach dem Perkolationsprinzip durchgeführt. Diese beiden Kohlenwasserstoffe gelten als mikrobiell leicht abbaubar. Parallel wurde der Kohlenwasserstoffabbau in Schüttelkolben untersucht, die nur das Prozesswasser, jedoch keinen Boden enthielten. Die Ergebnisse zeigen (Bild 4), dass sowohl n-Hexadekan als auch Phenanthren im Boden ebenfalls nur partiell abgebaut wurden. In wässriger Phase wurden n-Hexadekan und Phenanthren dagegen nahezu vollständig und Dieselkraftstoff zu einem wesentlich größeren Teil als im Boden umgesetzt. Damit wird deutlich, dass Sorptionseffekte für den unvollständigen Abbau im Boden verantwortlich sind. Die mit der BET-Methode (Diese Methode geht auf BRUNAUER, EMMETT und TELLER zurück und dient der Oberflächenbestimmung von Feststoffen auf mikroskopischer Ebene. Die Oberflächenmessung basiert auf der Bestimmung der Stickstoffmenge, die an der Oberfläche der Bodenpartikel bei einem bestimmten Druck bindet.) bestimmte innere Oberfläche des verwendeten Bodens war 120 mal größer als die mit der Siebanalyse ermittelte makroskopische Oberfläche. Diese Mikroporosität des Quarzsandes war die Ursache für die beobachteten unerwartet starken Wechselwirkungen zwischen Schadstoff und Bodenpartikeln.

Tensideinsatz zur Verbesserung der Bioverfügbarkeit

Die Bioverfügbarkeit von Kohlenwasserstoffen, die in Wasser schwer löslich sind, kann durch den Einsatz von Tensiden erhöht werden. Tenside sind oberflächenaktive Substanzen, deren Moleküle aus einem hydrophilen (wasseranziehenden) und einem hydrophoben (wasserabweisenden) Teil bestehen. In wässriger Lösung lagern sich die

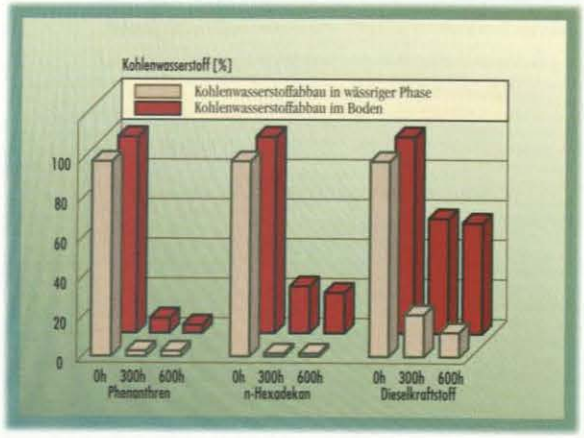


Bild 4: Mikrobieller Abbau von Dieselkraftstoff, Phenanthren und n-Hexadekan in wässriger Phase im Schüttelkolben bzw. im Boden in einem Laborperkolator (anfängliche Schadstoffkonzentration = 1 Gramm pro Liter im Prozesswasser bzw. 3 Gramm pro Kilogramm im Boden)

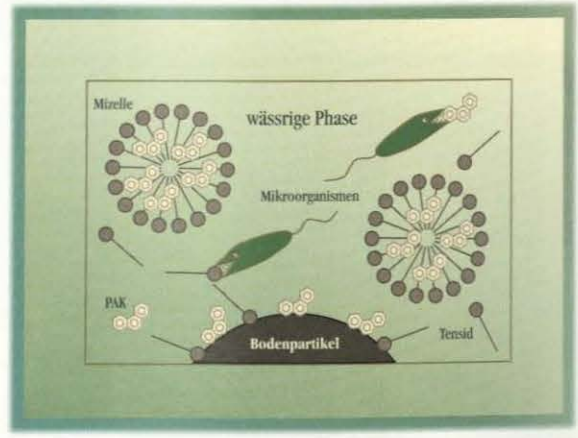


Bild 5: Wechselwirkungen zwischen wässriger Phase, Boden, Tensid, Kohlenwasserstoff und Mikroorganismen

Tenside zu Mizellen zusammen. In ihrem hydrophoben Kern können Mizellen Kohlenwasserstoffe einschließen (Bild 5), wodurch sich ihre Löslichkeit in der wässrigen Phase scheinbar erhöht. In wässriger Phase bewirken Tenside daher im allgemeinen eine Beschleunigung des

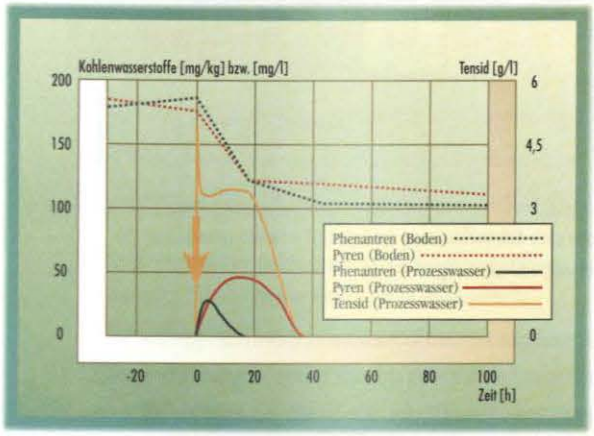
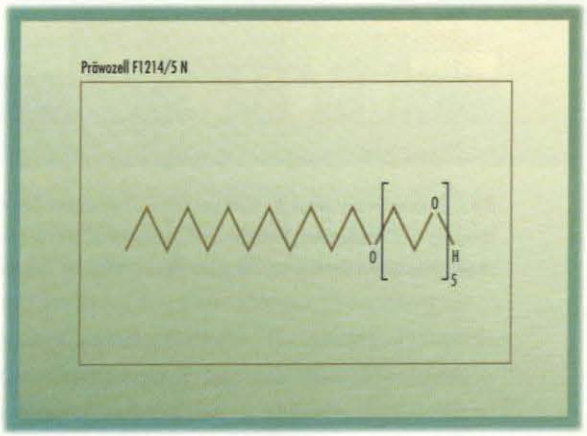


Bild 6: Solubilisierung und Abbau von Kohlenwasserstoffen in einem künstlich kontaminierten, bereits mikrobiell vorbehandelten Boden im Laborperkolator nach Zugabe von 2 Gramm des nichtionischen Tensids Präwozell F1214/5 N pro Liter Prozesswasser

Kohlenwasserstoffabbaus, sofern sie für die Mikroorganismen nicht toxisch sind. Die Wirkung von Tensiden in Systemen mit Boden ist dagegen widersprüchlich [3]. Die uneinheitlichen Resultate bei der Tensidanwendung im Boden sind auf die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen wässriger Phase, Boden, Kohlenwasserstoff, Tensid und Mikroorganismen zurückzuführen (Bild 5). So sorbieren nicht nur Kohlenwasserstoffe am Boden, sondern auch die Tensidmoleküle. Neben den Kohlenwasserstoffen werden auch die Tenside von den Mikroorganismen abgebaut. Die mikrobielle Abbaubarkeit der Tenside ist prinzipiell wünschenswert, um eine Belastung von Wasser und Boden mit einem neuen Schadstoff zu verhindern.

Da ein gezielter Tensideinsatz bei der Bodensanierung umfassende Kenntnisse zu den physikochemischen Eigenschaften des Systems erfordert, wurden ausgewählte nichtionogene Tenside umfangreich untersucht [4]. So erhöht beispielsweise die Zugabe von 2 Gramm Präwozell F1214/5 N (fünffach ethoxyliertes Gemisch aus C_{12}- und C_{14}-n-Alkanolen, siehe Formel) pro Liter eines Phenanthren-Wasser-Gemisches die Löslichkeit des Kohlenwasserstoffs um den Faktor 100.

Bild 6 zeigt beispielhaft, wie ein gezielter Tensideinsatz bei der Behandlung eines Kohlenwasserstoff-kontaminierten Bodens wirken kann. Nach einer aeroben Behandlung über 550 Stunden enthielt ein Boden, der anfänglich mit 3 Gramm Phenanthren und 1 Gramm Pyren je Kilogramm Boden beladen war, immer noch einen beträchtlichen Restschadstoffgehalt. Um der Stagnation des weiteren Koh-



lenwasserstoffabbaus entgegenzuwirken, wurden dem Prozesswasser 5 Gramm des Tensids Präwozell F1214/5 N pro Liter zugesetzt. Durch die teilweise Sorption am Boden nahm die Tensidkonzentration im Prozesswasser zunächst sprunghaft ab, pegelte sich dann aber auf einen konstanten Wert ein. Unter der Wirkung des Tensids ging ein Teil der Kohlenwasserstoffe in Lösung und wurde mikrobiell abgebaut. Dadurch verringerte sich der Kohlenwasserstoffgehalt des Bodens. Etwa 20 Stunden nach Tensidzugabe setzte ein massiver mikrobieller Tensidabbau ein und nach 35 Stunden war kein Tensid mehr nachweisbar. Weitere Versuche bestätigten, dass durch gezielten Tensideinsatz der Schadstoffabbau kurzzeitig beschleunigt werden kann. Der Effekt ist am größten, wenn die Tenside in der Endphase des biologischen Abbauprozesses zugegeben werden, dass heißt also, wenn die für die Mikroorganismen leicht zugänglichen Schadstoffe bereits abgebaut sind.

Versuche in der Bodensanierungsanlage Hirschfeld

Im Rahmen des Forschungsprojektes baute der Projektpartner Bauer und Mourik Umwelttechnik GmbH&Co. eine ehemalige Silageanlage in Hirschfeld bei Freiberg zu einer nach dem Perkolationsprinzip arbeitenden biologischen *ex-situ*-Bodensanierungsanlage um. Den schematischen Aufbau der Bodensanierungsanlage zeigt Bild 7. Das Behandlungsbecken fasst etwa 750 Tonnen Boden. Das Pro-

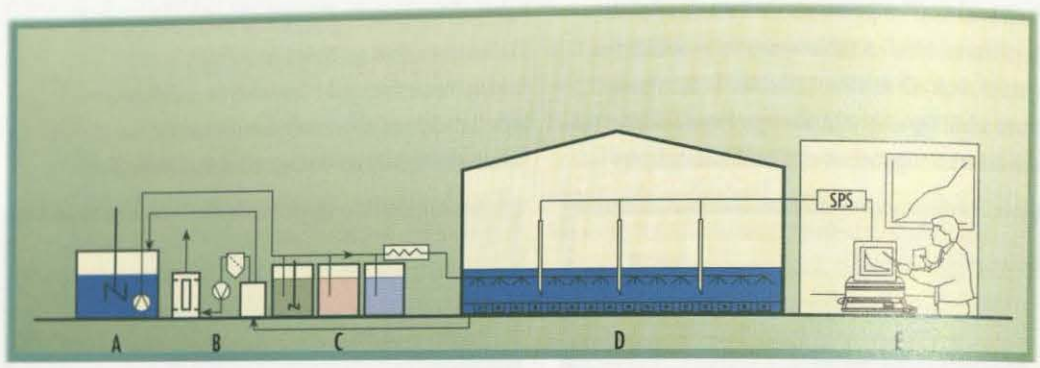


Bild 7: Bodensanierungsanlage der Bauer und Mourik Umwelttechnik GmbH & Co. in Hirschfeld bei Freiberg; A = Bioreaktor; B = Phasentrennung und Abluftreinigung; C = Prozesswasserkonditionierung (Regelung von pH-Wert und Temperatur sowie Nährstoffdosierung bei Bedarf); D = Sanierungsbecken mit Prozesswasserverteilung, Drainage und Ablauf; E = Messwerterfassung, Prozessvisualisierung und -steuerung

zesswasser wird aus dem 23 Kubikmeter fassenden Bioreaktor bezogen und vor der Verregnung in einem Biocontainer konditioniert (Regelung des pH-Wertes und der Temperatur, Zudosierung anorganischer Nährstoffe). Nach Durchsickern des Bodens läuft das Prozesswasser über eine Drainage wieder in den Bioreaktor zurück. Um aerobe Kultivierungsbedingungen zu gewährleisten, wird ein definierter

Bild 8: Modell der Bodenreinigungsanlage Hirschfeld (Foto: Norma Neuheiser)

Luftstrom durch den Boden gesaugt. Die Perkolationsanlage lässt eine gezielte Prozessführung hinsichtlich der Sauerstoff-, Nährstoff- und Feuchtigkeitsversorgung des Bodens sowie des pH-Wertes des Prozesswassers zu. Durch eine computergestützte online-Prozessüberwachung kann der Sanierungsverlauf messtechnisch erfasst und bei Verlassen des optimalen Bereiches regulierend eingegriffen werden. Da die Silageanlage günstige bauliche Voraussetzungen für die Realisierung des Perkolationsprinzips bot, konnten die Kosten für die Errichtung der Anlage niedrig gehalten werden.

Um Kosten zu reduzieren, wurde untersucht, ob die Sanierungsdauer verkürzt werden kann, indem die Aktivität der autochtonen Bodenmikroorganismen – die im Boden angestammte Mikroflora – in kontaminierten Böden erhöht wird. In einem Großversuch wurde in der Praxisanlage ein Boden, der von einem Tankstellengelände stammte und etwa 1600 Milligramm Mineralölkohlenwasserstoffe je Kilogramm Boden enthielt, über einen Zeitraum von 115 Tagen behandelt [5]. Während der gesamten Behandlungsdauer wurde das Prozesswasser im Bereich von pH 7...8 (neutral bis schwach basisch) gehalten. Durch die gesteuerte Zugabe von Ammoniumchlorid (NH_4Cl) und Natriumdihydrogenphosphat (NaH_2PO_4) wurden sowohl Nährstoffmangel als auch die übermäßige Nährstoffakkumulation im Prozesswasser verhindert.

Großen Einfluss auf die biologische Aktivität und die Geschwindigkeit des Schadstoffabbaus hat die Bodentemperatur. Diese überstieg in der Praxisanlage auch in der wärmeren Jahreszeit nicht 12 Grad Celsius. Die Erwärmung des perkolierten Prozesswassers auf 35 Grad Celsius führte

Bild 9: Bodenreinigungsanlage Hirschfeld (Foto: Norma Neuheiser)

Bild 10: Beprobung des Bodens im Behandlungsbecken der Bodenreinigungsanlage Hirschfeld zur Überwachung des Sanierungsverlaufes (Foto: Norma Neuheiser)

nur zu einem geringen Temperaturanstieg im Boden. Temperaturmessungen über das Bodenprofil ergaben, dass die Wärmeverluste nicht wie erwartet am Beckenboden, sondern vorrangig an der Bodenoberfläche auftraten. Daher wurde die Oberfläche segmentweise mit verschiedenen Isoliermaterialien abgedeckt und der Schadstoffabbau in den einzelnen Segmenten individuell verfolgt. Die stärkste Bodenerwärmung und der intensivste Kohlenwasserstoffabbau wurde in einem Segment beobachtet, das mit einer 20 Zentimeter dicken Holzhäckselschicht abgedeckt war. Aber auch mit der leichter aufzubringenden Luftpolsterfolie wurde ein positiver Effekt erzielt (Bild 11).

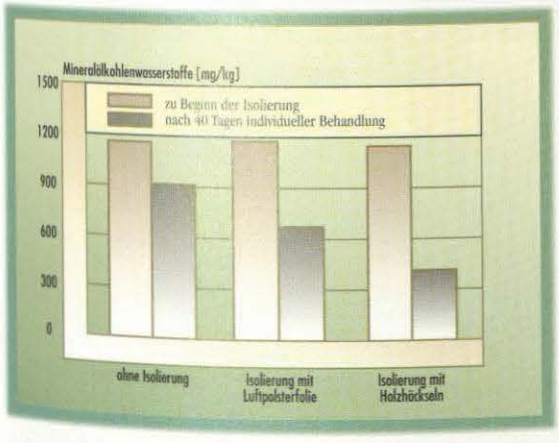


Bild 11: Schadstoffabbau in einem mit Mineralölkohlenwasserstoffen kontaminierten Boden in der Bodensanierungsanlage Hirschfeld in Abhängigkeit der Wärmeisolierung an der Bodenoberfläche

Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass in Perkolationsanlagen mittels physikalischer und chemischer Maßnahmen biologische Abbauprozesse gesteuert werden können und damit – in Abhängigkeit vom zu behandelnden Boden – der Sanierungszeitraum bis zum Erreichen der geforderten Schadstoffgrenzwerte deutlich verkürzt bzw. die Restschadstoffkonzentration verringert werden kann. Auf diese Weise können mit relativ geringem technischen Aufwand die Kosten der biologischen Bodenreinigungsverfahren gesenkt werden. Um die Erkenntnisse, die im Labor- und Technikumsmaßstab unter Modellbedingungen gewonnenen wurden, in die Praxis umzusetzen, sind weitere Versuche unter realen Bedingungen erforderlich.
Gegenwärtig werden in der Anlage Hirschfeld an einem mineralölkontaminierten Boden mit schluffigen Anteilen prozesstechnische Maßnahmen getestet, bei denen Bodenerwärmung und Tensideinsatz gezielt kombiniert werden.

Literatur

[1] Löser, C.; Zehnsdorf, A.; Jenz, S.; Seidel, H.; Stottmeister, U.: Der Einfluss periodischer aerob-anaerob-Wechsel auf den mikrobiellen Kohlenwasserstoffabbau im Boden. In: Neue Techniken der Bodenreinigung - Hamburger Berichte Bd.10, 385-396. Bonn: Economica Verlag (1996).

[2] Löser, C.; Seidel, H.; Zehnsdorf, A.; Stottmeister, U.: Microbial degradation of hydrocarbons in soil during aerobic/anaerobic changes and under pure aerobic conditions. Appl. Microbiol. Biotechnol. 50 (1998) im Druck.

[3] Laha, S.; Liu, Z.; Edwards, D.A.; Luthy, R.G.: Surfactant solubilization of phenanthrene in soil-aqueous systems and its effects on biomineralization. Adv. Chem Ser. (Aquatic Chemistry) 244 (1995) 339-361.

[4] Löser, C.; Seidel, H.; Hoffmann, P.; Stottmeister, U.: Der Einfluss wechselnder Milieubedingungen auf den biologischen Kohlenwasserstoffabbau im Boden - periodischer aerob-anaerob-Wechsel und gesteuerter Tensideinsatz. In: Biologische und chemische Behandlung von PAK-haltigen Böden und Abwässern. - Schriftenreihe Biologische Abwasserreinigung Bd.7, 159-180. Berlin: Technische Universität Berlin, SFB 193 (1996).

[5] Zehnsdorf, A.; Hoffmann, P.; Fischer, R.: Untersuchungen zur Steigerung der Effektivität einer mikrobiologischen Bodensanierungsanlage. Altlastensprektrum 7 (1998) im Druck.

English Abstract

Biological soil cleaning - from research to practice

As a raw material, soil cannot be reproduced and is hardly renewable. It forms the basis of our nourishment, yet it is also a complex ecosystem with numerous functions. It stores, filters and buffers water, provides nutrients, is part of matter cycles, holds raw materials, and serves the plant and animal kingdom (and ultimately mankind) as the basis of life. Man uses and exploits the soil in a variety of ways. Habitation, industrial activities, agriculture, transport, mining, waste disposal and recreational pursuits can quickly destroy the soil's functions.

One particular form of soil pollution is that represented by contaminated sites. These include hazardous areas created at industrial sites by unregulated waste disposal or the negligent handling of problematic substances, as well as soil pollution caused by accidents in the storage and transportation of hazardous substances, and leaks from tank farms and pipes. To make such soils reusable, the pollutant must be eliminated and the soil rehabilitated. One possibility is in situ remediation, in which the contaminated soil remains underground. However, this process cannot always be applied and is still linked to numerous difficulties such as attaining and maintaining the optimum environmental conditions, incomplete degradation processes, and measuring the success of remediation. Therefore ex situ techniques are often used, in which the contaminated soil is removed and treated by means of biological, physicochemical or thermal cleaning processes.

Biological soil-cleaning systems are based on the ability of microorganisms to break down pollutants. In a practical research project sponsored by the DBU (Federal German Environmental Foundation), ways were sought to use the potential of adapted microorganisms to break down pollutants more effectively by controlling environmental conditions. A disused silage plant from a former farm was converted to make a soil-cleaning system functioning on the percolation principle. The percolation principle means that water is circulated and trickles across a solid. The degradation products are carried off in the process water and at the same time the nutrients required by the microorganisms to grow are supplied.

Although such percolation systems require much more complicated design work than simple soil piles (in which the soil is merely mixed thoroughly and at best moistened), process control can be used to affect the remediation process in various ways. As a result the faster pollutant degradation reduces the treatment time and so the correspondingly higher throughput of contaminated soil leads to significant cost savings. The project was executed jointly by the UFZ Leipzig-Halle and the company Bauer und Mourik Umwelttechnik GmbH & Co.

JAHRESBERICHT / ANNUAL REPORT
1996 - 1997

Gewässerforschung Magdeburg

RS

Helmholtz-Zentrum für
Umweltforschung GmbH - UFZ
Zentralbibliothek
Permoserstraße 15
D - 04318 Leipzig
12-497 MA

Jahresbericht 1996-1997

Herausgeber:
UFZ-Umweltforschungszentrum
Leipzig-Halle GmbH
Mitglied der Hermann von Helmholtz-
Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren
(HGF)
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
Telefon 0341/235-0

Konzept und Redaktion:
Dipl.-Chem. Doris Böhme
Dipl.-Agr.-Päd. Susanne Hufe
Telefon 0341/235-2278

Translation:
Abbey & Friedrich GbR
»The english people«, Leipzig

Fotos:
Norma Neuheiser u.a.

Luftbilder S. 118, 128:
Aerokart Delitzsch

Titel- und Layoutgestaltung,
Foto S. 8/16 und Produktion:
Peter Barczewski

Satz:
Silvio Andreé
Karsten Heim
Bernd Jünger
Kerstin Kummer

Belichtung:
Design To Print GmbH

Druck und Verarbeitung:
Messedruck Leipzig GmbH

© August 1998

Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige
Verwendung nur nach vorheriger Absprache
mit dem UFZ gestattet.

Gedruckt auf umweltfreundlichem,
chlorfrei gebleichtem Papier

ISSN 0948-6925