

FORSCHEN FÜR DIE UMWELT / 4. AUSGABE
RADIOWELLEN UNTERSTÜTZEN DIE BODENREINIGUNG
Ulf Roland

RADIOWELLEN UNTERSTÜTZEN DIE BODENREINIGUNG

Ulf Roland

Die natürliche Ressource Boden zu erhalten und zu regenerieren, ist ein entscheidender Aspekt für eine nachhaltige Entwicklung und erfordert kostengünstige und effiziente Verfahren zur Bodenreinigung.

Derartige Techniken sollten möglichst *in situ*, on site und *ex situ* einsetzbar sein. Besondere Anforderungen entstehen dann, wenn Böden komplex mit sehr unterschiedlichen Schadstoffen belastet sind.

Die Temperatur beeinflusst eine Vielzahl von Parametern, die für die Bodensanierung relevant sind. Wird der Boden gezielt aufgeheizt, können die Mobilität von Schadstoffen, ihre Wasserlöslichkeit und ihr Dampfdruck erhöht werden. Mikroorganismen sind bei erhöhten Temperaturen aktiver, die optimalen Temperaturen für den mikrobiellen Abbau von Schadstoffen liegen meist im Bereich zwischen 30 und 40°C.

Durch Temperaturerhöhung werden Adsorptions- und Verteilungsgleichgewichte zugunsten einer Schadstofffreisetzung verschoben. Schadstoffe werden besser bioverfügbar, da die Temperatur eine Reihe von physikalisch-chemischen Parametern verändert (Bild 1). Deshalb haben thermisch unterstützte Bodenreinigungsverfahren in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen und werden international als innovative Methoden eingestuft.

Autoren:

*Ulf Roland, Dr. rer. nat., ist Mitarbeiter
der Sektion Sanierungsforschung am UFZ in Leipzig.*

*Dieser Artikel entstand auf der Grundlage wissenschaftlicher
Arbeiten und Publikationen sowie unter Mitwirkung von
Dipl.-Ing. Frank Holzer und Dipl.-Ing. Ralf Blechschmidt
(Wissenschaftspark Leipzig/Permoserstraße e.V.) sowie*

*Prof. Dr. rer. nat. Frank-Dieter Kopinke
(UFZ, Sektion Sanierungsforschung).*

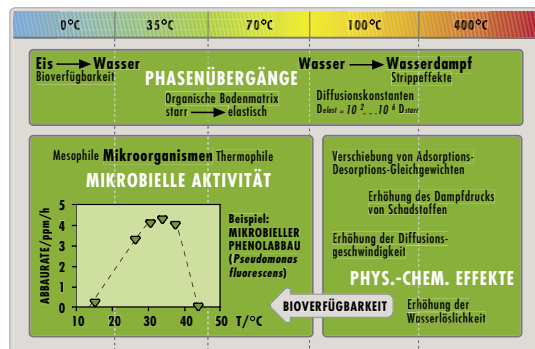


Bild 1: Der Einfluss der Temperatur auf verschiedene Parameter, die für die Reinigung kontaminierter Böden relevant sind.

Bislang gibt es jedoch nur wenige Verfahren, bei denen die Bodentemperatur unter *in situ*-Bedingungen gezielt beeinflusst werden kann. Eine Möglichkeit, lokal sehr hohe Temperaturen zu realisieren, besteht darin, *Heizlanzen* in den Boden einzubringen. Allerdings treten, besonders in schlecht Wärme leitenden Materialien wie trockenen Böden, erhebliche Temperaturgradienten auf. Aus diesem Grund ist es kaum möglich, mikrobielle Reinigungsvorgänge mit dieser Methode effektiv zu unterstützen.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der *Erwärmung mittels Heißluft oder Dampf*. Diese Methode erfordert, dass der Boden ausreichend durchlässig ist. Außerdem können damit in der Regel nur Temperaturen bis maximal 100°C erreicht werden, und es besteht der Nachteil, dass das eingesetzte Hilfsmedium – die Heißluft oder der Dampf – kontaminiert wird und anschließend wieder gereinigt werden muss.

Elektrische Heizmethoden, die auf der ohmschen Erwärmung (Widerstandsheizung) beruhen, lassen sich in der Regel nur in feuchten Böden, also ebenfalls unterhalb einer Temperatur von 100°C, einsetzen.

Die *dielektrische Bodenerwärmung mit Radiowellen* hingegen ist für praktisch alle Materialien, seien es trockene oder feuchte, sandige oder schluffige Böden, in einem weiten Temperaturbereich von unterhalb 0°C bis oberhalb von 400°C einsetzbar. Das Wirkprinzip entspricht dem einer Mikrowellenheizung. Wesentlich für den Einsatz im Rahmen von Bodenreinigungsverfahren ist allerdings, dass die Wirkung einige Meter tief in den Boden reichen kann. Ein weiterer Vorteil der dielektrischen Bodenheizung besteht darin, dass die Wärme direkt im Bodenvolumen erzeugt wird und Wärmetransportprozesse über Korngrenzen und Oberflächen nicht limitierend sind. Das Verfahren wird seit einigen Jahren am UFZ entwickelt und mittlerweile im Feldmaßstab erfolgreich erprobt.

Wo können thermisch unterstützte Bodenreinigungsverfahren angewendet werden?

Die Möglichkeit, mittels Radiowellen größere Bodenkompartimente – einige Kubikmeter – definiert bis zu Temperaturen von über 400°C zu erwärmen, eröffnet eine Reihe von Optionen, Bodenreinigungsverfahren zu verbessern:

1. Böden in Permafrostgebieten können aufgetaut und anschließend mit unterschiedlichen Reinigungsverfahren weiter behandelt werden.
2. Der mikrobielle Schadstoffabbau kann thermisch unterstützt werden, indem die Temperatur im optimalen Bereich von in der Regel 30 bis 40°C eingestellt wird. Damit wird die Sanierung von der Jahreszeit unabhängig.
3. Kompostierungsverfahren können dann verbessert werden, wenn ein autothermes Regime nicht möglich ist.
4. In einem Temperaturbereich bis typischerweise zirka 200°C können Schadstoffe thermisch desorbiert und mit der Bodenluft abgesaugt werden (Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung).
5. Bodenerwärmung mit Radiowellen kann bei Reinigungsverfahren, die auf der Wasserdampfdestillation (Strippeffekt) im Temperaturbereich um 100°C basieren, eingesetzt werden. Dabei wirkt das aus dem Porenraum verdampfende Wasser als Transportmedium.
6. Böden und Abfallstoffe können mit dieser Methode hygienisiert werden.
7. Chemische Reaktionen der Schadstoffe (Hydrolyse, Oxidation, gegebenenfalls auch Reaktionen mit der Bodenmatrix) können thermisch initiiert werden, wobei meist Temperaturen oberhalb von 400°C anzuwenden sind.
8. Feststoffe können zur Schadstoffimmobilisierung verglast werden.

In der Regel beruhen thermisch unterstützte Verfahren zur Bodenreinigung *nicht* darauf, dass Schadstoffe durch den Wärmeinput zerstört werden. Vielmehr werden durch die Temperaturerhöhung andere, zum Teil bereits etablierte Verfahren effektiver und damit insgesamt kostengünstiger gestaltet.

Bewährungsprobe für die thermisch unterstützte mikrobielle Bodenreinigung – Standort: Bodenreinigungsanlage Hirschfeld

Die thermisch unterstützte mikrobielle Bodenreinigung besitzt den Vorteil, dass der Schadstoffabbau bereits mit vergleichsweise geringem Energieeinsatz deutlich gesteigert werden kann. Meist wird der Boden bis zirka 35°C aufgeheizt. Die Temperatur wird

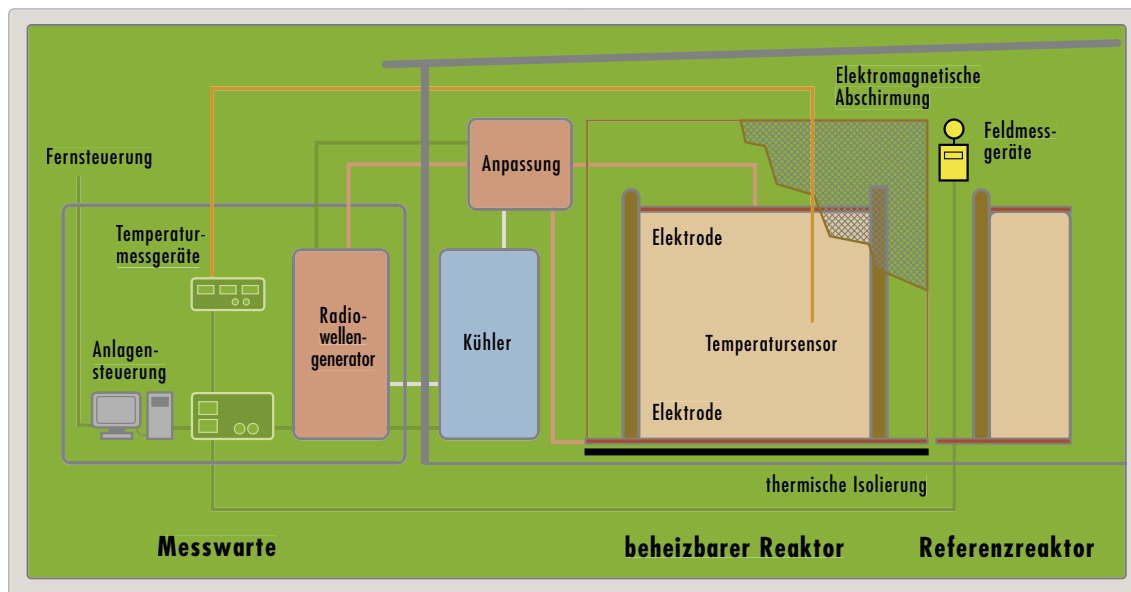


Bild 2: Schematische Darstellung der Anlage zur Radiowellen-Bodenerwärmung in der Bodenreinigungsanlage Hirschfeld der Firma Bauer & Mourik Umwelttechnik



Bild 3: Der Reaktor zur Radiowellenerwärmung in der Halle des Bodenreinigungszentrums Hirschfeld (Quelle: UFZ, Sektion Sanierungsforschung)

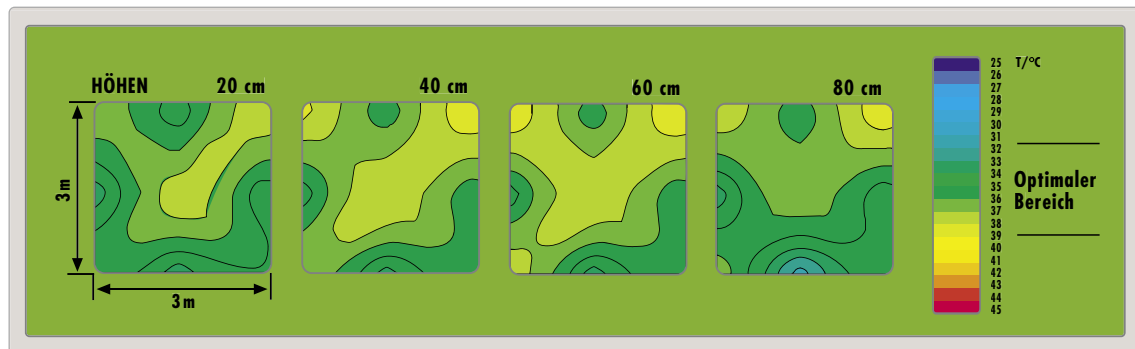


Bild 4: Durch einen gepulsten Leistungseintrag und die Ausnutzung von Wärmeausgleichsprozessen im Boden können relativ homogene Temperaturprofile im gewünschten Bereich realisiert werden.

durch die Kompensation von Wärmeverlusten stabilisiert. Außerdem werden im Idealfall die Kohlenwasserstoffe vollständig zu Kohlendioxid und Wasser abgebaut. Dadurch kann auf eine Abluftreinigung oft verzichtet werden.

In der Bodenreinigungsanlage Hirschfeld der Firma Bauer & Mourik Umwelttechnik wurde die Radiowellen-Bodenerwärmung in einer Bodenmiete mit einem Volumen von etwa 15 Kubikmetern zur Temperierung eingesetzt. In Bild 2 ist die Anlage schematisch dargestellt. Bild 3 zeigt die heizbare Bodenmiete in der Halle des Bodenreinigungszentrums Hirschfeld.

Durch einen gepulsten Leistungseintrag und die Ausnutzung von Wärmeausgleichsprozessen im Boden können relativ homogene Temperaturprofile im gewünschten Bereich realisiert werden (Bild 4). In einem Langzeitversuch wurde ein stark kontaminierter Boden, der etwa 2,5 Masseprozent Mineralölkohlenwasserstoffe, zirka 0,15 Masseprozent BTEX-Aromaten (Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole) und zirka 0,04 Masseprozent polyzyklische Aromaten enthält, einer thermisch unterstützten mikrobiellen Reinigung unterzogen. In einer Referenzmiete wurde derselbe Boden zu Vergleichszwecken nicht extern beheizt, aber in gleicher Weise ge-

düngt und belüftet. Durch Erwärmung auf eine mittlere Mientemperatur von 37°C erhöhte sich die Bodenatmung deutlich. Gleichzeitig nahm der Abbau organischer Schadstoffe zu. Das Besondere an diesem Versuch war, dass der Boden durch den Schadenseigner bereits mit Kalk versetzt worden war und deshalb einen hohen Ausgangs-pH-Wert von zirka 11,6 besaß. Deshalb konnte das Kohlendioxid, das durch die Bodenatmung entstand, erst nachgewiesen werden, als der pH-Wert im Boden entsprechend abgenommen hatte. Die Sauerstoffzehrung dagegen spiegelt direkt wider, wie die mikrobielle Aktivität zunahm (Bild 5).

In der unbeheizten Vergleichsmiete (Bild 6) nahm zwar nach einer gewissen Zeit die Bodenatmung ebenfalls zu, und die Tem-

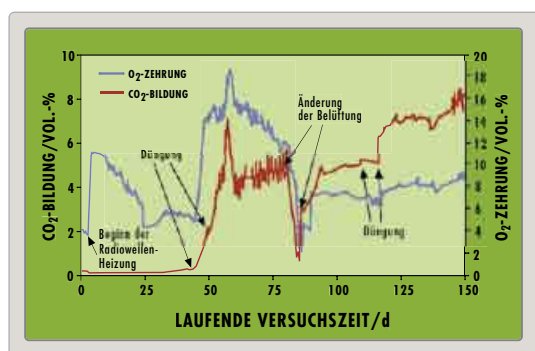


Bild 5: Langzeitversuch zur thermisch unterstützten Bodenreinigung.

Die Sauerstoffzehrung zeigt, wie die mikrobielle Aktivität – auch angezeigt durch die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration in der abgesaugten Bodenluft – zunimmt.

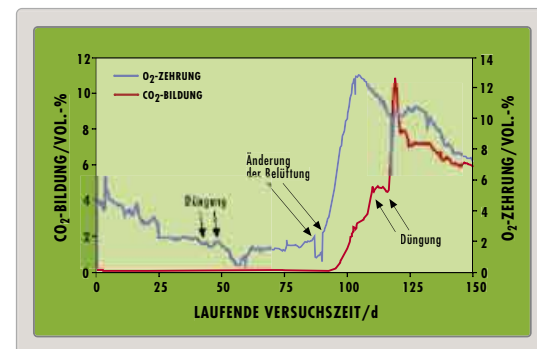


Bild 6: In der unbeheizten Vergleichsmiete nahm zwar nach einer gewissen Zeit die Bodenatmung ebenfalls zu, und die Temperatur erhöhte sich durch Eigenerwärmung, allerdings traten diese Effekte gegenüber der mit Radiowellen beheizten Miete etwa zwei Monate später auf.

peratur erhöhte sich durch Eigenerwärmung, allerdings traten diese Effekte gegenüber der mit Radiowellen beheizten Miete etwa zwei Monate später auf. Die Vorteile der Radiowellen-Bodenerwärmung kommen besonders dann zum Tragen, wenn die Außentemperatur niedrig ist und die verfügbaren Kohlenstoffquellen nicht für eine signifikante Eigenerwärmung ausreichen.

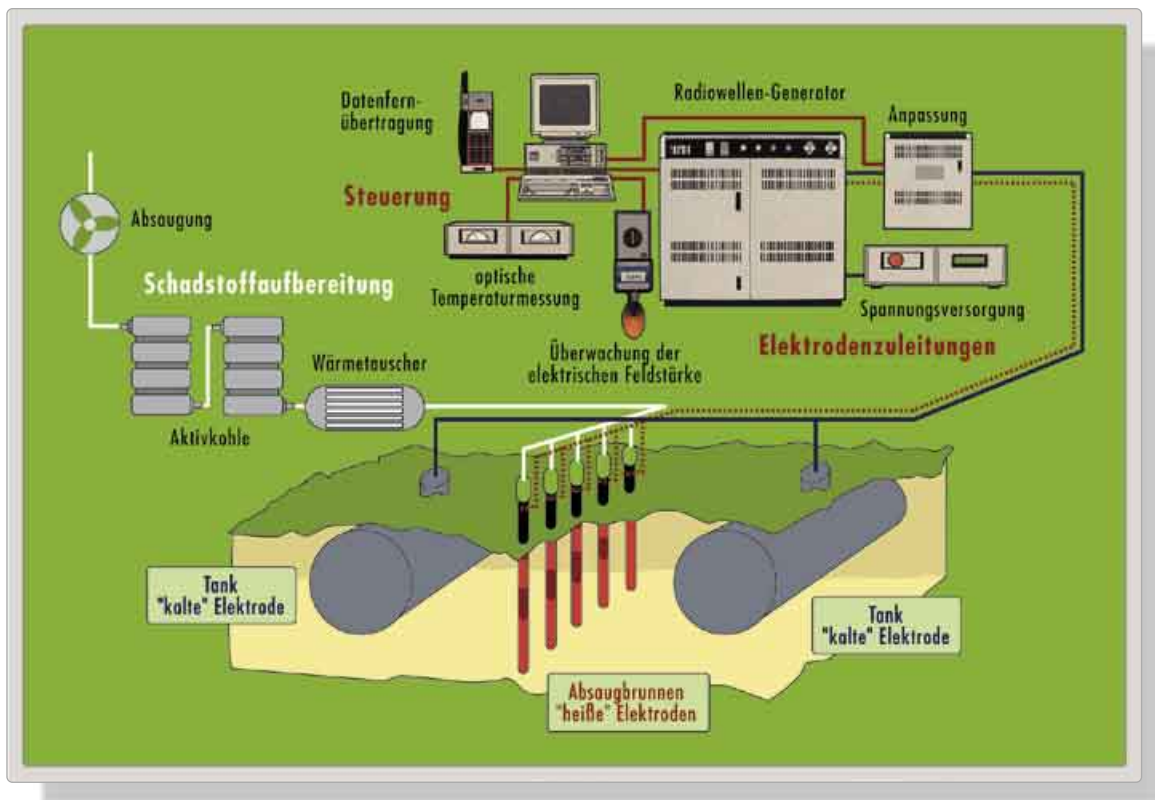


Bild 7: Prinzipieller Aufbau der Anlage zur thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung (TUBA)

Bewährungsprobe für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung – Sanierungsfall: ein ehemaliges Lösungsmitteltanklager

Bei der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung (TUBA) wird die Tatsache ausgenutzt, dass Dampfdruck und Mobilität von Schadstoffen mit erhöhter Temperatur zunehmen. Dies ist neben der direkten Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit darauf zurückzuführen, dass strukturelle Veränderungen in der organischen Bodenmatrix auftreten, also dort, wo organische Schadstoffe vorwiegend gebunden sind, werden bei höherer Temperatur verstärkt desorbiert. Der prinzipielle Aufbau einer Anlage zur TUBA ist in Bild 7 dargestellt. In dem konkreten Sanierungsfall sollte Boden im Bereich eines ehemaligen Lösungsmitteltanklagers gereinigt werden, ohne dass die unterirdischen Tanks entfernt werden konnten. Das scheinbare Problem wurde Teil der Lösung, die Tanks wurden als »kalte« Elektroden in das Elektrodensystem zur Radiowellen-Erwärmung integriert. Im Sanierungsbereich angeordnete Absaugbrunnen dienten gleichzeitig als Gegenelektroden, so genannte »heiße« Elektroden. Im Übrigen wurden die Komponenten einer herkömmlichen Anlage zur Bodenluftabsaugung verwendet (Bild 9a und b).

In einem mehrwöchigen Versuch – in Kooperation mit dem Institut für Nichtklassische Chemie an der Universität Leipzig und der Firma ECOSOL Bottrop – wurde der mit BTEX-Aromaten (vor allem Xylenen und Ethylbenzol) kontaminierte Bereich zwischen zwei Tanks auf eine Temperatur von etwa 60 °C erwärmt (Bild 8). Die Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft nahmen infolge-

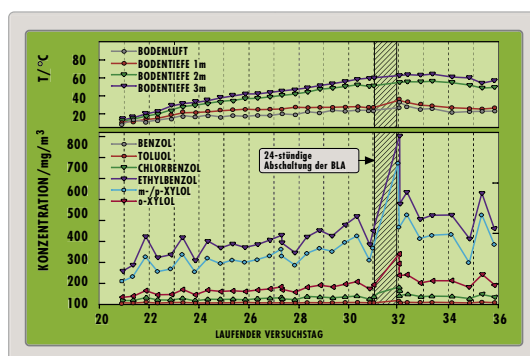


Bild 8: In einem mehrwöchigen Versuch wurde der mit BTEX-Aromaten (vor allem Xylenen und Ethylbenzol) kontaminierte Bereich zwischen zwei Tanks auf eine Temperatur von etwa 60 °C erwärmt. Die Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft nahmen infolgedessen deutlich zu. Als die Bodenluftabsaugung (BLA) vorübergehend abgeschaltet wurde (schraffierter Bereich), erhöhte sich die Temperatur und die Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft nahmen weiter zu.



Bild 9a und b: Für den Bau der Anlage wurden neben der Radiowellen-Technik (9a) herkömmliche Komponenten zur Bodenluftabsaugung (9b) verwendet (Quelle: UFZ, Sektion Sanierungsforschung).

dessen deutlich (um den Faktor zwei bis drei) zu. Als die Bodenluftabsaugung vorübergehend abgeschaltet wurde (schraffierter Bereich in Bild 8), erhöhte sich die Temperatur und die Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft nahmen weiter zu. Es wurden auch Versuche durchgeführt, die zeigten, dass durch eine erhöhte Leistungsdichte (Radiowellen-Leistung pro Bodenvolumen) eine Erwärmung bis über 100°C problemlos möglich ist. Wird außerdem das Absaugregime zum Beispiel durch optimierte Perforierung der Elektroden oder Steuerung der Volumenströme über die einzelnen Absaugbrunnen verändert, können die Schadstoffe noch schneller über die Bodenluft ausgetragen werden. Durch die Versuche im Feldmaßstab wurde nachgewiesen, dass durch die Kombination von Radiowellen-Bodenerwärmung und Bodenluftabsaugung die Sanierungsdauer deutlich verkürzt werden kann. Die Integration von im Boden befindlichen Tanks als Elektroden war erfolgreich.

Bewährungsprobe für die lokale Bodenerwärmung in Kombination mit der Horizontalbohrtechnik – Sanierungsfall: eine ehemalige Tankstelle

Die Radiowellen-Bodenerwärmung besitzt einen weiteren großen Vorteil: sie kann in bebautem Gelände eingesetzt werden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Geotechnik der TU Bergakade-

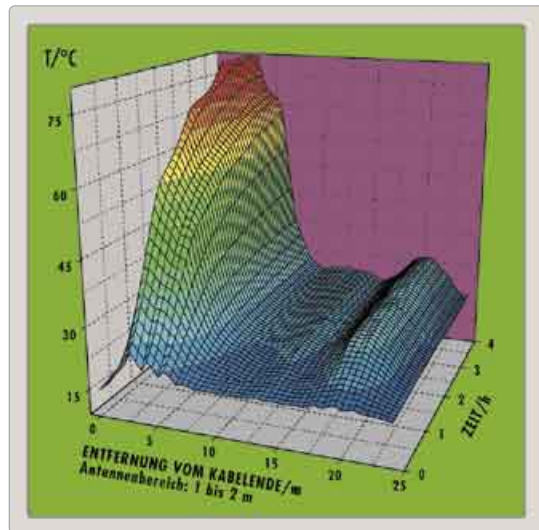


Bild 11: Die Besonderheit der verwendeten Antennengeometrie: Die Radiowellen-Abstrahlung ist auf einen relativ kleinen Bereich fokussierbar. Das führt dazu, dass ein kleines Bodenkompartment selektiv erwärmt werden kann.

mie Freiberg wurde das Verfahren mit der Horizontalbohrtechnik kombiniert, um einen begrenzten Bodenbereich unterhalb einer ehemaligen Tankstelle (Standort Hoyerswerda) selektiv zu erwärmen. Dazu wurde eine Radiowellen-Antenne im zu erwärmenden Bereich – zirka 30 Meter von der Eintrittsstelle des Horizontalfilterrohres entfernt – platziert (Bild 10).

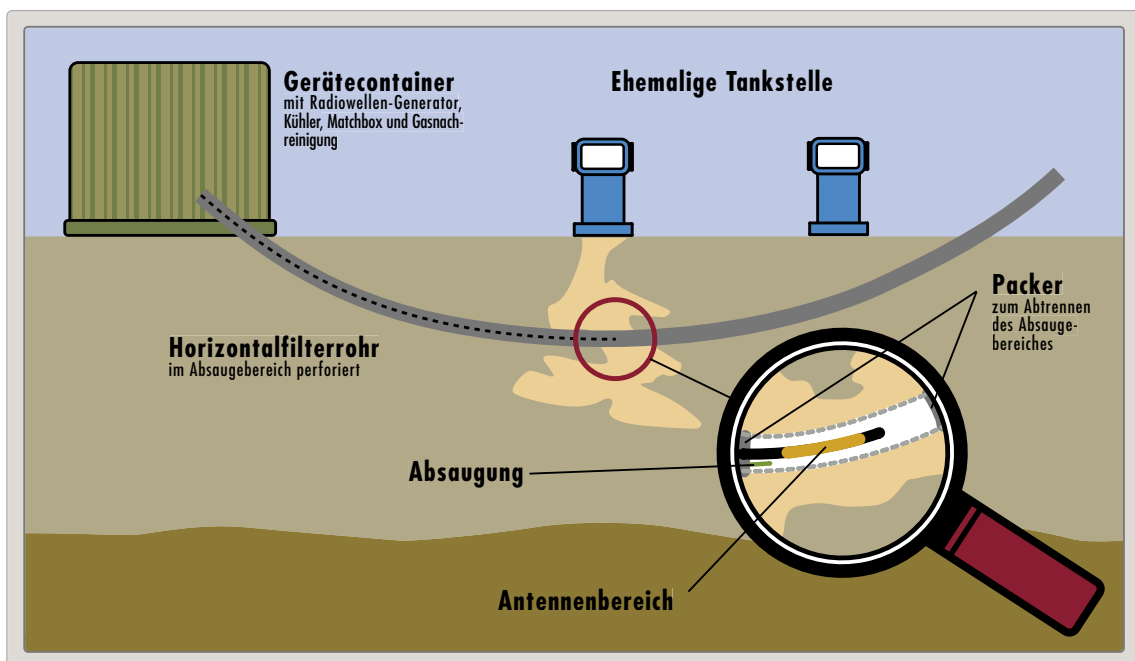


Bild 10: Durch Kombination des Verfahrens mit der Horizontalbohrtechnik ist es möglich, einen begrenzten Bodenbereich unterhalb einer ehemaligen Tankstelle selektiv zu erwärmen. Dazu wurde eine Radiowellen-Antenne im zu erwärmenden Bereich – etwa 30 Meter von der Eintrittsstelle des Horizontalfilterrohres entfernt – platziert.



Bild 11 veranschaulicht die Besonderheit der verwendeten Antennengeometrie.

Beim Feldversuch am Standort Hoyerswerda wurde die Temperaturerhöhung auf 15 Kelvin begrenzt, um nachfolgende mikrobielle Abbautests nicht zu gefährden (Bild 12).

Zusammenfassung und Ausblick

Die dielektrische Bodenerwärmung mit Radiowellen eignet sich hervorragend, bereits etablierte Bodenreinigungsverfahren effektiver und vielseitiger zu gestalten und zu optimieren. Aus wirtschaftlicher Sicht ist allerdings zu berücksichtigen, dass die (physikalisch notwendige) Energie durch hochwertige elektrische Energie, die bereits nur mit einer Effizienz von etwa einem Drittel produ-

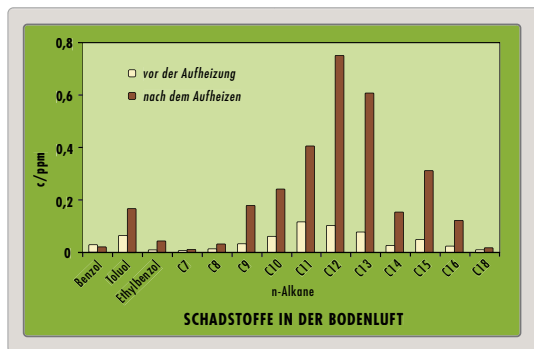


Bild 12: Durch die selektive Bodenerwärmung nahm die Konzentration für alle Kontaminanten in der Bodenluft, die über das Horizontalfilterrohr abgesaugt wurde, zu.

ziert wurde, zur Verfügung gestellt wird und die Wandlungsverluste in Radiowellen-Energie etwa 40 Prozent betragen. Die gewünschte Transformation in Wärme erfolgt dagegen mit einem sehr hohen Wirkungsgrad von über 90 Prozent. Dieser Aspekt und die entsprechende notwendige Geräteausrüstung bringen es mit sich, dass das Anwendungspotenzial weniger in der Sanierung großer Flächen als vielmehr für Aufgaben mit speziellen Anforderungen gesehen werden. Dazu gehören unter anderem

- *in situ*-Sanierungsmaßnahmen, gegebenenfalls im bebauten Gelände oder unter versiegelten Flächen,
- räumlich begrenzte Sanierungsvorhaben, bei denen der Zeitfaktor eine wichtige Rolle spielt,
- die Behandlung komplexer Schadensfälle (persistente Verbindungen, bindige Böden), bei denen andere Verfahren versagen,
- Maßnahmen unter komplizierten klimatischen Bedingungen
- oder die Sanierung stark kontaminierter Bereiche (Quellensanierung).

Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der gewünschten Endtemperaturen, Aufheizraten und Bodeneigenschaften aus.

Konzentrierten sich die ersten Arbeiten zur Bodenerwärmung mit Radiowellen vor allem auf die Grundlagenforschung sowie die Erprobung verschiedener Verfahrensvarianten im Technikums- und Feldmaßstab, sollen zukünftig voll feldfähige, modulare Gerätesysteme zur elektrisch unterstützten Bodensanierung entwickelt werden. Die bisherigen Arbeiten wurden vom UFZ getragen und durch Drittmittel des BMBF intensiv gefördert. Auf dem Weg von der Forschung zur Verfahrensentwicklung und Anwendung wird eng mit Industriepartnern aus dem Gerätebau und der Sanierungspraxis kooperiert. So hat die Radiowellen-Technologie eine echte Chance, erfolgreich in den deutschen und internationalen Markt eingeführt zu werden.