

Der Boden elektrifiziert

Elektrosanierung in der Retro- und Prospektive

Die Idee, dass der Einsatz von Elektrizität mit den traditionellen Methoden der Bodensanierung konkurrieren könnte, schien Mitte der achtziger Jahre ein unsinniger Gedanke. Ganz sicher in den Niederlanden, wo die Bodensanierung in jener Zeit mit Abgraben, Ablagern oder Verbrennen von Erde und dem Hochpumpen und Reinigen vieler Hunderttausende von Kubikmetern meistens nur leicht verunreinigtes Grundwasser gleichgesetzt wurde. Es waren die Jahre der prozessmäßigen Bodenreinigung, und für die in-situ Sanierung gab es in den Niederlanden, hauptsächlich als Folge des Multifunktionalitätsprinzips, kaum einen Markt. Inzwischen hat sich die Situation von Multifunktionalität in Funktionalität geändert, und die in-situ Sanierung steht im Mittelpunkt des Interesses und damit auch die Techniken, die dabei eingesetzt werden. Eine davon ist Elektrosanierung, und in Publikationen aus letzter Zeit wird der Eindruck erweckt, als wäre es noch immer eine "emerging technology", eine Entwicklung der letzten Jahre. Das Gegenteil ist jedoch wahr! Es folgt ein Rückblick und ein Blick in die Zukunft.

Reinout Lageman und Wiebe Pool, November 2000

Kurze Geschichte

Im Gegensatz zu den Niederlanden hatte man im Ausland schon früher damit angefangen, in-situ Techniken zu entwickeln. Bodenluftextraktion wurde beispielsweise schon ab Anfang der achtziger Jahre in den Vereinigten Staaten durchgeführt, und in Deutschland beschäftigte man sich Ende der achtziger Jahre schon mit „Bioventing“. Tonböden und Schwermetalle waren bei Sanierungen jedoch ein unlösbares Problem, und elektrokinetische Techniken boten sich dabei als mögliche Lösung an.

Die Geschichte lehrt, dass schon seit mehr als 70 Jahren elektrokinetische Techniken im Boden angewendet werden. Bis in die achtziger Jahre richtete sich das Interesse hauptsächlich auf das Entwässern und Stabilisieren von Tonböden und das Entfernen von Salz aus versalzten Agrarböden. In den achtziger Jahren fanden die ersten Untersuchungen statt, deren Ziel es war, toxische Ionen elektrochemisch aus dem Boden zu entfernen.

Die elektrokinetischen Erscheinungen Elektro-Osmose und Elektromigration wurden in den USA und Europa von verschiedenen Gruppen untersucht. Die Ergebnisse dieser ersten Untersuchungen und Feldexperimente erfüllten die Erwartungen nicht. Ursachen dafür waren u.a., dass die elektrochemischen Veränderungen um die Elektroden nicht beherrscht werden konnten. Außerdem wurde die Kationsaustauschkapazität des "echten" Bodens im Vergleich mit den Modellsystemen, wie sie bei Laborversuchen gebraucht wurden, nicht berücksichtigt. Verschiedene Forscher in den USA konzentrierten sich hauptsächlich auf das Phänomen Elektro-Osmose. Auch in diesem Fall wurden die gewünschten Resultate nicht erzielt.

Der Durchbruch kam 1987. Durch Lageman, Pool und Seffinga wurde der Nachweis erbracht, dass es in der Praxis möglich ist, Schwermetalle durch Elektromigration aus dem Boden zu entfernen. Dafür brachten Sie die Elektroden in einem Gehäuse an, das Ionen durchlässt, und pumpen darin eine Flüssigkeit um, womit u.a. pH und Redoxpotential konditioniert werden können. Die von ihnen Ende 1987 gegründete Firma Geokinetics führte 1989 in Loppersum als erstes Unternehmen der Welt in diesem Bereich eine erfolgreiche kommerzielle in-situ Sanierung mit Hilfe der Elektrosanierung (inzwischen patentiert) durch. Es handelte sich um den Standort eines ehemaligen Holzimprägnierungsbetriebes, dessen Boden mit Arsen verunreinigt war. Auf Einladung des Ministeriums von VROM (niederländisches Ministerium für Wohnungsbau, Raumordnung und Umwelt) wurden die Ergebnisse 1989 auf der NATO-CCMS Konferenz in Kopenhagen präsentiert. Von diesem Zeitpunkt an nahm das Interesse für diese Technologie weltweit sehr stark zu. Das Interesse hat sich jedoch in der Hauptsache auf Forschungsinstitute und Universitäten beschränkt. Vom praktischen Gesichtspunkt aus betrachtet, haben die Publikationen von Wissenschaftlern und Untersuchern während der letzten zehn Jahre dieser Technologie wenig Neues hinzugefügt.

In Deutschland wurde Mitte der neunziger Jahre "Geooxidation" als neue Technik für die in-situ Sanierung von mit organischen Stoffen verunreinigten Böden präsentiert. Hier ist nicht bekannt, ob sich diese Technologie auch tatsächlich kommerziell lohnend entwickelt hat.

1995 wurde Geokinetics International in Berkeley, Kalifornien, gegründet. In den Niederlanden wurde Geokinetics 1995 unter dem Namen A. Hak Milieutechniek/Geokinetics weitergeführt. Im Jahre 2000 werden die Elektrosanierungsprojekte und sonstige Aktivitäten in den Niederlanden von Hak Milieutechniek b.v. ausgeführt.

Forschung und Entwicklung (R & D)

Trotz des immer noch nicht sehr günstigen Marktes für in-situ Sanierungen in den Niederlanden in der ersten Hälfte der neunziger Jahre wurden Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet fortgesetzt. Nach 1992 richtete sich das Interesse hauptsächlich auf die Anwendungsmöglichkeiten der Elektrosanierung zur Entfernung organischer Verunreinigungen. Verschiedene Ursachen lagen dieser Veränderung zugrunde: 1. Bodenverunreinigung mit Schwermetallen wurde als ein weniger dringendes Problem betrachtet. 2. Grundwassersanierungen verliefen weniger erfolgreich als berechnet und mussten in vielen Fällen um ein Jahrzehnt bzw. viele Jahrzehnte verlängert werden. 3. Während der in-situ Sanierungen von mit Schwermetallen verunreinigten Böden hatte sich herausgestellt, dass die Konzentrationen anderer Verunreinigungen ebenfalls abnahmen.

Im Zeitraum von 1990 bis 1996 wurden dann verschiedene Konzepte für mögliche Anwendungen von Techniken, die auf elektrischem Strom basiert sind⁴, entwickelt und getestet:

Studie nach den Möglichkeiten elektrokinetischer Schirme : Aufgrund einer realen Situation einer mit Zink verunreinigten Grundwasserfahne bis zu einer Tiefe von 80 m –mv wurde mit Hilfe von Computersimulationen und einem Labormodell mit Grundwasser, das vom Standort entnommen worden war, eine Untersuchung durchgeführt. Die Studie ergab u.a., dass sich die Ergebnisse von Computersimulationen und Laborversuchen gut ergänzten. Im Labormodell wurden > 99 % des Zinks durch den Schirm aufgefangen. Außerdem ging aus der Studie hervor, dass Parameter, wie z.B. Elektrodenabstände und die erforderliche elektrische Leistung ohne weiteres in die Praxis umgesetzt werden können.

Laborversuche nach den Anwendungsmöglichkeiten von Dielektrophorese zum Entfernen von polaren und apolaren toxischen organischen Verbindungen: Die Versuche ergaben, dass Aromaten, PAK, PCB, Pestizide, Phenole u.dgl. auf diese Art und Weise aus dem Boden entfernt werden konnten. Gleichzeitig stellte sich heraus, dass sich dieses Verfahren nicht für in-situ Sanierungen eignete.

Studie nach den Möglichkeiten, biologischen Abbau mit Hilfe elektrokinetischer Techniken zu unterstützen : Der Versuch ergab u.a., dass Mikro-Organismen unter Einfluss eines elektrischen Feldes im Boden fortbewegt werden können, dass elektrischer Strom einen positiven Effekt auf ihr Wachstum hat und dass Nährstoffe elektrokinetisch durch den Boden transportiert werden können;

Studie nach der Möglichkeit, Baggeraushub und Klärschlamm) elektrokinetisch zu reinigen: Der Versuch zeigte, dass durch Einsatz keramischer Verarbeitungseinheiten sowohl anorganische als auch organischer Verunreinigung effizient und wirtschaftlich entfernt werden können. Da für einen Vertrag für großangelegte Schlammverarbeitung für mehrere Jahrzehnte keine Garantie gewährt werden konnte, blieb es damals nur bei den Laborversuchen.

Feldversuche in Bezug auf die Anwendung elektrischer Erwärmung des Bodens zur Entfernung organischer Verunreinigungen: Der Versuch zeigte, dass Temperaturerhöhung in Kombination mit Bodenluftextraktion, Grundwasserentzug und Nährstoffinjektion für die in-situ Entfernung organischer Verunreinigungen, wie z.B. Mineralöl und Chlorkohlenwasserstoffe, sehr effektiv ist.

Feldversuch Elektrosanierung mit Boden (150 t), der mit Zyanid und PAK (beide >> I-Werte) verunreinigt ist: Das Ergebnis dieses in einem zeitweiligen Depot durchgeführten Versuchs von drei Monaten war, dass kein freies Zyanid mehr gefunden wurde, dass das Zyanid völlig bis unter die (niederländischen) Zwischenwerte und die Konzentration an PAK auf etwas über den Zielwert zurückgebracht worden war.

Die Sachlage

Seit 1994 kommt die Anwendung der Elektrosanierung für in-situ Sanierung organischer Verunreinigungen, wie z.B. Diesel, Benzin, Heizöl, PAK und Lösungsmittel wie Per und Tri voll zum Einsatz. Der "Elektro"-Teil der Sanierung bezieht sich in diesem Fall auf die Erwärmung des Bodens, den sogenannten Joule-Effekt, der auftritt, wenn ein elektrischer Strom hindurchgeleitet wird. Durch die erhöhte Temperatur werden die Verunreinigungen mobil. In Kombination mit anderen in-situ Techniken wie Bodenluftextraktion und Grundwasserentzug werden sie anschließend in Form von Gas, Dampf oder in flüssiger Form aus dem Boden geholt.

Eine erhöhte Temperatur wirkt sich auch günstig auf die mikrobiologische Aktivität im Boden aus. Eigene Versuche haben gezeigt, dass auch bei Temperaturen von 70 °C noch von intensivem mikrobiologischem Leben gesprochen werden kann. Wenn man die Mikro-Organismen auch mit Nährstoffen, Sauerstoff bzw. Elektronendonoren bzw. -akzeptoren versorgt, wird der biologische Abbau weiter beschleunigt. Es war deshalb naheliegend, diese Art der Bodensanierung Elektro(bio)sanierung zu nennen.

In den Niederlanden konnte Elektro(bio)sanierung ab 1996 fast nahtlos in die neue pragmatische Sanierungspolitik eingefügt werden, wobei das strenge Prinzip *alles muss sauber sein bis auf einen fiktiven A-Wert* durch eine wesentlich nuanciertere (funktionale) Haltung ersetzt wurde: Was ist der Verwendungszweck des verunreinigten Standortes, was ist realisierbar und welche Risiken bestehen, wenn noch eine Restverunreinigung übrigbleibt. In den vergangenen fünf Jahren wurden fünfzehn Elektro(bio)sanierungsprojekte durchgeführt und abgeschlossen; zwölf weitere Projekte befinden sich noch in der Ausführung.

Es handelt sich dabei größtenteils um Projekte, die als ernste Fälle von Bodenverunreinigung charakterisiert werden. Es betrifft Verunreinigungen, die sich ganz oder teilweise unter Gebäuden befinden, in Wohnvierteln, in großer Tiefe bzw. in schlecht durchlässigen Ton- und Moorböden. Es sind Verunreinigungen wie Diesel-, Heizöl und Benzin, PAK, Per und Tri und ihre Abbauprodukte.

Daneben spielt Elektro(bio)sanierung eine wichtige Rolle bei der heutzutage sehr populären "natural attenuation" oder extensiven Sanierung, wobei möglichst viel den mikrobiologischen Abbauprozessen überlassen wird. Diese Art der Sanierung hat vor allem Beschränkungen da, wo hohe Konzentrationen von Verunreinigungen oder noch ungelöstes Produkt vorkommen. Mit Elektrosanierung können diese "hotspots" in einer intensiven Sanierungsphase in Angriff genommen und optimale Voraussetzungen für eine anschließende extensive Biosanierung geschaffen werden. In Horst wurden während der Intensivphase bis zu 7 m tief bei einem ehemaligen Öllager und einer Tankstelle 21 m³ reines Öl entfernt. In Maasdam fand 1993 eine Kalamität an einer unterirdischen Benzinleitung statt, wobei schätzungsweise 50 m³ Benzin ausliefen. 1998 und 1999 wurde hier ein Bodenvolumen von 11500 m³ innerhalb von 74 Wochen saniert. In Nieuwpoort findet zur Zeit eine Sanierung unter einem denkmalgeschützten Gebäude und unter einem Wohnviertel auf dem Gelände einer ehemaligen Silberfabrik statt. Hier war unsorgfältig mit Lösungsmitteln wie Per und Tri umgegangen worden. Inzwischen wurde (stellenweise bis zu 14 m tief) schon gut 60 kg CKW entfernt. In dem Wohnkomplex Heygraeff in Woudenberg wurden während einer Intensivphase von 13 Monaten gut 7800 Liter Heizöl von ursprünglich 9000 Litern, die ausgelaufen waren, entfernt. In der anschließenden extensiven Phase von 19 Monaten wurden noch weitere 1000 Liter Heizöl durch Biosanierung aus dem Boden entfernt. In Assen kommt Elektro(bio)sanierung zum Einsatz, um eine Restverunreinigung von Per und Tri in einer Tiefe von 8 m zu entfernen. In Dordrecht wurde eine Sanierung vollständig von innen durchgeführt. In Bezug auf den Umfang fallen vier dieser 20 Projekte in die Kategorie von einer bis ungefähr drei Mio. NLG.

Blick in die Zukunft

Für das kommende Jahrzehnt wird erneutes Interesse für den Einsatz von in-situ Elektrosanierung für ehemalige Gasfabriksgelände gezeigt. Auch das Konzept der elektrokinetischen Schirme an den Rändern verunreinigter Grundwasserfahnen erfreut sich eines zunehmenden Interesses. Außer als unterirdischer Schirm zum Auffangen von

Schwermetallen können mit derartigen Schirmen auch Nährstoffe bzw. Elektronendonoren bzw. -akzeptoren durch ihre elektrische Ladung homogen innerhalb einer relativ engen Zone verteilt werden. Innerhalb dieser Zone wird das mit organischen Verbindungen verunreinigte Grundwasser durch elektrokinetisch stimulierten natürlichen Abbau gereinigt. Charakteristisch für dieses Verfahren ist, dass nicht Hunderttausende von Kubikmetern meistens nur leicht verunreinigtes Grundwasser hochgepumpt werden müssen und dass das Grundwasserströmungssystem nicht beeinflusst wird. Ein Pilotprojekt für einen elektrokinetischen Bioschirm wird Ende 2000 in Groningen starten. Die elektrische Energie für diese Art Schirme kann in bestimmten Fällen durch Windmühlen oder Sonnenenergiezellen geliefert werden.

Nachwort

Am Anfang des neuen Millenniums kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich die Elektrosanierung zu einer vollwertigen und vielseitigen in-situ Sanierungstechnologie sowohl für anorganische als auch organische Verunreinigungen entwickelt hat. Die Entwicklung und Vorgehensweise waren von Anfang an auf die Praxis ausgerichtet. Da wir von der Zweckmäßigkeit und Funktionalität der in-situ Sanierung überzeugt waren, hat dies dazu geführt, dass im Jahre 2000 Elektro(bio)sanierung eine führende Rolle in den Niederlanden spielt.

Literatur

1. **Casagrande, L., 1947**
The Application of Electro-Osmosis to Practical Problems in Foundations and Earthworks. Building Research Technical Paper No 3, Department of Scientific and Industrial Research. London.
2. **Collopy, J.P., 1958**
US patent 2831304.
3. **Agard, J.B.R., 1981**
A study of electroreclamation and its applications to the removal of toxic metals from contaminated soils. M.Sc thesis. Univ. of Manchester.
4. **Lageman, R., W. Pool und G.A. Seffinga, 1988**
Electro-Reclamatie, een nieuwe techniek voor in-situ reiniging. Land, Water en Milieutechniek (mei).
5. **Pool, W.**
European patent 0312174, April 1989 and US patent 5, 433,829. July 1995. US patent 5,589, 056, priority date Oct 1987
6. **Lageman, R., 1989**
NATO/CCMS Pilot Study: Demonstration of Remedial Action Technologies for Contaminated Land and Groundwater, Theory & Practice of Electro-Reclamation, Copenhagen
7. **Probstein, R.F., P.C. Renaud, and A.P. Shapiro 1991**
Electroosmosis Techniques for Removing Materials from Soil. US Patent, No. 5,074,986, Dec.24
8. **Acar, Y.B., 1992**
Electrochemical Decontamination of Soils or Slurries. US Patent, No. 5,137,608
9. **Döring, F., 1994**
Untersuchungen zur elektrochemischen Bodensanierung am Beispiel der Sanierung eines Schwelereigeländes. Terra Tech 2 1994, S.52-56
10. **Grünzig, H., G. Ludwig und D. Rahmer, 1995**
Studie zur elektrochemischen Sanierung kontaminierter Böden. Technische Universität Dresden, Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie
11. **Lageman, R., W. Pool und R.L. Clarke, 1997**
The use of electro-reclamation for removal of toxic inorganic and organic contaminants from soil and groundwater. Electrosynthesis Corp, Clearwater Beach, Florida.

Über die Autoren

Drs. R. Lageman ist Geophysiker/ Hydrogeologe und Direktor / Seniorberater von Lambda Consult
Drs. W. Pool ist Geologe / Prozess-technologe und als Chef R & D bei Holland Environment b.v. beschäftigt