

## 580 Elektrokinetische Bodenbehandlung

### 580.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

#### 580.1.1 Allgemeines

Die Sanierung bebauter und revitalisierter Altlastenstandorte ist zunehmend an Verfahren gebunden, durch deren Einsatz das Auskoffern des schadstoffbelasteten Bodens vermieden werden kann. Ein derartiges in-situ anwendbares Verfahren stellt die elektrokinetische Sanierung kontaminierter Böden dar. Durch die Erzeugung eines elektrischen Feldes im kontaminierten Untergrund ermöglichen elektrokinetische Prozesse einen gezielten Transport von mobilen Schadstoffen im Boden. Grundvoraussetzung ist das Vorhandensein einer ausreichenden Menge von Porenwasser, das eine hinreichend große elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes gewährleistet und als Transportmedium der Schadstoffe dient. Die Elektrokinetik ist hierbei insbesondere für die Entfernung von anorganischen (Schwermetalle, Arsen, Cyanide etc.) als auch polarer (Phenole, Sprengstoffe etc.) und unpolare organischer Schadstoffe (BTEX, LHKW, KW, PAK, PCB, PCDD/F etc.) aus Böden geeignet. Elektrokinetische Sanierungsverfahren eröffnen dabei erstmals die Möglichkeit einer kostengünstigen und erfolgversprechenden In-situ-Sanierung auch feinkörniger hochkontaminierter Böden und Gesteine.

Tabelle 1: Prinzipielle Eignung verschiedener Schadstoffgruppen für die elektrokinetische Bodensanierung  
(nach Zorn et al., 2001)

Schadstoffe	geeignet	bedingt geeignet	nicht geeignet
Schwermetalle, Pb, Cd, Cr, Zn, Cu	X		
Schwermetalle (As), Hg		X	
Phenole (organisch / wasserlöslich)	X		
LHKW * (organisch / wasserlöslich)	X	X	X
PAK (organisch / wasserlöslich)			X

\* Die Eignung hängt davon ab, wieviel als Phase vorliegt.

Zur Ausführung werden Elektrodenpaare in den kontaminierten Untergrund eingebracht und an eine Gleichstrom(DC)-Quelle angeschlossen. Das hierbei in den Boden induzierte elektrische Feld regt einen gerichteten Transport des Porenwassers und der darin gelösten mobilen Schadstoffe zu den jeweiligen Elektroden an. An den Elektroden können die Schadstoffe gesammelt, immobilisiert und/oder durch Entzug der kontaminierten Spül- bzw. Elektrodenflüssigkeit mittels Pumpen entfernt werden. Die zur Elimination der Schadstoffe aus dem Boden verwendete Elektrodenflüssigkeit (Wasser mit schadensabhängig die Sanierungsleistung fördernden Additiven) kann nach entsprechender Aufbereitung im Kreislauf gefahren werden. Die Abtrennung der Schadstoffe aus der Elektrodenflüssigkeit erfolgt mittels spezieller Verfahren (z. B. elektrochemisch).

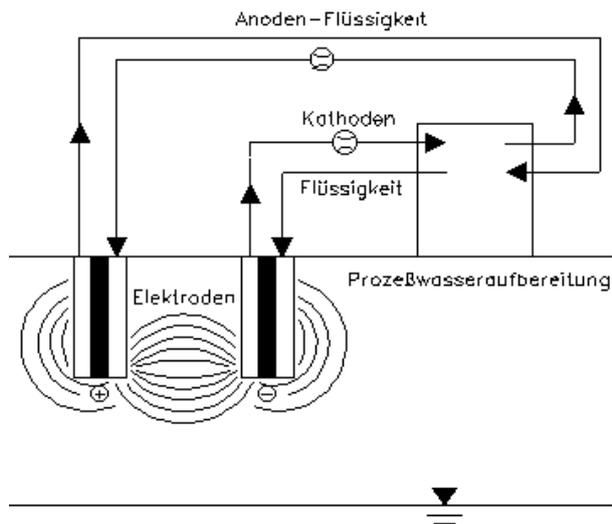


Abbildung 1: Prinzip der elektrokinetischen In-Situ-Sanierung in der ungesättigten Zone

### 580.1.2 Theoretische Grundlagen der Elektrokinetik

Die naturwissenschaftlichen Grundlagen der Elektrokinetik sind unabhängig von der Anwendung seit Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts bekannt und verstanden. In der Bautechnik und der Exploration von Lagerstätten sind elektrokinetische Verfahren zudem Stand der Technik.

Grundlage jeder elektrokinetischen Bodensanierung sind die physikalisch-chemischen Prozesse, die beim Anlegen eines elektrischen Feldes im Boden auftreten (HAUS et al. 2002, MARB et al. 2000):

- **Elektromigration**  
Transport der Ionen (Kat- und Anionen) in der Porenflüssigkeit entsprechend ihrer Ladung zur Kathode bzw. Anode, wobei die Wanderungsgeschwindigkeit von der Ladung, der elektrischen Feldstärke und der Größe des hydratisierten Ions abhängig ist.
- **Elektroosmose**  
Bewegung des Porenwassers und der darin geladenen und ungeladenen gelösten Schadstoffe über diffusive Ionenschichten an der kapillaren Grenzfläche zwischen Porenlösung und Mineral. Die Effektivität der Elektroosmose nimmt mit abnehmender Korngröße zu.
- **Elektrophorese**  
Wanderung elektrisch geladener kolloidaler Teilchen (Tonpartikel oder komplexe Huminstoffmoleküle mit Durchmesser  $> 100 \text{ \AA}$ ) im elektrischen Feld. Bei der Sanierung feinkörniger Böden ist der Einfluss der Elektrophorese unbedeutend.
- **Elektrochemische Redoxprozesse**  
Bei Übertragung des elektrischen Stroms an den Elektrodenoberflächen auf ein wässriges Medium erfolgt an der Anode eine Oxidation (Elektronenabgabe) und an der Kathode eine Reduktion der Stoffe (Elektronenaufnahme).

- **Bodenerwärmung**

Da der poröse Bodenkörper die Wanderung elektrisch geladener Teilchen im angelegten elektrischen Feld wie ein elektrischer Widerstand behindert, kommt es zur Erhöhung der inneren Energie und damit zur Bodenerwärmung (Joule'sche Wärme), die proportional zur elektrischen Leistung ist und zur einer erhöhten Beweglichkeit aller Teilchen in der Porenflüssigkeit führt.

Für die Elektrosmose und die Elektromigration müssen die zu entfernenden Schadstoffe wasserlöslich sein. Bei der Sanierung feinkörniger Böden spielt die Elektrophorese nur eine untergeordnete Rolle.

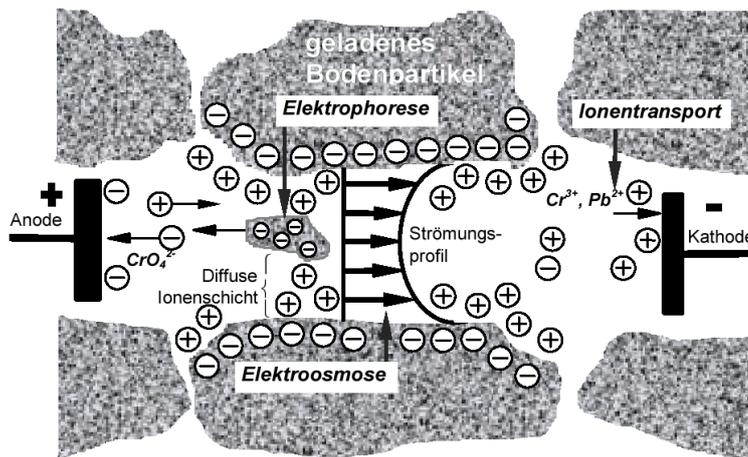


Abbildung 2: Darstellung der elektrokinetischen Transportmechanismen im Boden

Der Einsatz elektrischer Energie kann an den Elektroden spezifische Reaktionen (elektrochemische Redoxprozesse) auslösen, die im Untergrund zu Veränderungen des pH-Wertes, des Mineralbestandes, der Elektrolytkonzentration, der ionaren Zusammensetzung der Porenlösung sowie der Stabilität und Ladung oberflächenaktiver Minerale (vgl. Tabelle 2) führen.

Tabelle 2: Elektrochemische Redoxprozesse (ZORN et al. 2001)

	Kathode (-)	Anode (+)
<b>Prozess</b>	Reduktion	Oxidation
<b>Potential</b>	Niedrig	Hoch
<b>Redox-Prozess</b>	$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$	$2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$
<b>PH</b>	Alkalisch	sauer
<b>Schwermetalle</b>	Fällung (Oxide, Hydroxide, Carbonate, Komplexe)	Lösung
<b>Wassergehalt</b>	Steigt	Nimmt ab

### 580.1.3 Einsatzmöglichkeiten und Vorteile gegenüber anderen in-situ-Verfahren

Die elektrokinetische Bodensanierung zeigt gegenüber herkömmlichen hydraulischen (pump-and-treat) und pneumatischen (Bodenluftabsaugung) Sanierungsvarianten zahlreiche Vorteile (HAUS & ZORN 1998, MARB et al. 2000) auf:

- Einsatz bei feinkörnigen Böden mit hohem Wasserrückhaltevermögen
- Einsatz bei wechsellagernden Sedimentserien (z.B. Tonlinse in einem Kiesaquifer)
- gezielte horizontale und vertikale Ausrichtung auf den Sanierungsbereich durch Beschränkung des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden

- Einsatz auch bei schlecht erreichbaren Schadensherden (z.B. bebaute Altlasten)
- Gute Kombinationsmöglichkeit mit konventionellen Sanierungstechniken.

### 580.1.3.1 Bodeneigenschaften

Die Anwendung elektrokinetischer Sanierungstechniken ist besonders für homogene feinkörnige Böden mit hohem Wasserrückhaltevermögen, wie tonhaltige und schluffige Böden, geeignet. Dies ist zum einem dadurch begründet, dass deren kleine Bodenpartikel eine große Oberfläche aufweisen, die zur einer hohen elektroosmotischen Geschwindigkeit führen, wobei mit abnehmender Korngröße die Effektivität der Elektroosmose steigt. Zum anderen ermöglicht das hohe Wasserrückhaltevermögen einen gesicherten Transport der Schadstoffe zu den Elektroden und eine stabile Prozessführung ohne die Gefahr des vertikalen Schadstoffaustrags. Grobkörnige Böden erschweren hingegen die elektrokinetische Bodensanierung und sind mit o.g. herkömmlichen Verfahren effizienter und kostengünstiger zu sanieren.

In einem tonhaltigen und oder schluffigen Untergrund können elektrokinetische Verfahren auch in der ungesättigten Zone eingesetzt werden, da ein solcher Boden sehr leicht und schnell elektroosmotisch aufgesättigt werden (HAUS et al. 2002). Für einen elektroosmotischen Wassertransport wird nach den bisherigen Erfahrungen eine Sättigung des Bodens von ca. 80 % benötigt, um einen gleichbleibenden elektrisch induzierten Wassertransport aufrecht zu erhalten (HAUS 2002). Ausreichende elektromigrative Transportgeschwindigkeiten werden dagegen schon bei einem dünnen zusammenhängenden Porenwasserfilm (50-70 % Sättigung je nach Boden) initiiert.

Durch die Gegenwart von Huminstoffen im Boden wird die Entfernung von zur Komplexbildung neigenden Schwermetallen, insbesondere Kupfer, Nickel und Blei erschwert (MARB et al. 2000). Liegen ungünstige pH-Bedingungen vor, können sich im Bodenwasser gelöste Schwermetallkomplexe bilden, die unter Einfluss eines elektrischen Feldes nicht aus dem Bodenkörper entfernt werden können. Eine stabile Prozessführung wird durch Böden begünstigt, die eine hohe Säureneutralisationskapazität besitzen; die anodisch erzeugte Säure kann dadurch ohne gravierende Änderung des Bodenmilieus abgepuffert werden. Im Boden enthaltene lösliche Salze erhöhen die Bodenleitfähigkeit, so dass eine hohe Feldstärke nur mit hohem Stromverbrauch, der wiederum einen hohen Verbrauch an Neutralisierungschemikalien zur Folge hat, erzielt werden kann. Der Einfluss der wesentlichen Bodenkenngrößen auf den Erfolg der elektrokinetischen Sanierungsverfahren ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt (MARB et al. 2000).

Einfluss der wesentlichen Bodenkenngrößen bei der Elektrokinetik (MARB et al. 2000)

Bodenkenngröße	Einfluss	Positiv / negativ
<b>Bodenwasser</b>	Transportmedium	++
<b>Tonanteil</b>	Elektroosmose, Wasserrückhaltevermögen	++
<b>Kalkanteil</b>	Puffereigenschaften, Freisetzung von Calciumionen und hoher Stromverbrauch, Mobilisierung von anorganischen Schadstoffen (Schwermetalle) im Kalkanteil	+/-
<b>pH-Wert</b>	Stärke des elektroosmotischen Flusses; Ausbildung der Schadstoffspezies	+/-
<b>Redoxpotential</b>	Ausbildung der Schadstoffspezies	+/-
<b>Salze</b>	hoher Stromverbrauch und Entsalzung	-
<b>Humus</b>	Komplexierung von Schwermetallen wie Cu, Ni, Pb	--
<b>Heterogenität</b>	nichtlineare Feldstärke (Bereiche mit hohem elektrischen Widerstand wie Mauerreste, Felsen, Hohlräume etc.)	-

### 580.1.3.2 Schadstoffe

Mittels elektrokinetischer Verfahren ist prinzipiell die Entfernung oder Abbau von

- Schwermetallen, Arsen und Cyanid,
- polaren organischen Verbindungen wie Säuren, Pestiziden und Phenolen sowie
- unpolaren organischen Verbindungen wie Benzol und Trichlorethen, PAK aber auch PCB, KW und Leicht- und Maschinenölen

aus Böden möglich. Für die Nutzung der Prozesse Elektromigration, Elektroosmose und Elektrophorese ist es jedoch erforderlich, dass der zu sanierende Schadstoff in mobiler oder mobilisierbarer Form vorliegt. Elektrochemische Stoffumwandlungsprozesse (Redoxprozesse) können genutzt werden, um den Bodenkörper anodenseitig mit Sauerstoff zu versorgen und somit die Aktivität aerober Mikroorganismen zu verbessern, organische Schadstoffe an der Anode oxidativ abzubauen (z.B. Phenole) oder Metalle an der Kathode reduktiv abzuschneiden (z.B. Kupfer).

Bei **Schwermetallen und Metalloiden** wirken die drei elektrokinetischen Transportmechanismen Elektromigration, Elektroosmose und Elektrophorese, wobei der elektromigrative Transport jedoch überwiegt. Im Rahmen der elektrokinetischen Sanierung können die Schwermetalle zumeist als kationische Schadstoffspezies aus den Boden entfernt werden oder durch Umwandlung immobilisiert werden. Nach dem derzeitigen Stand der Forschung ist die elektrokinetische Schwermetallentfernung insbesondere für die Sanierung von feinkörnigen Böden geeignet, die aufgrund einer hohen Fracht an mobilen Schadstoffen eine große Gefährdung darstellen. Im Rahmen des vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen geförderten Forschungsvorhaben zur „Elektrokinetischen Reinigung kontaminierter Böden“ (MARB et al. 2000) wurden anhand von Labor- und Technikumsversuchen „Orientierungswerte“ zur Anwendung elektrokinetischer Techniken bei der Schwermetallentfernung aus kontaminierten Böden ermittelt, die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt sind.

Orientierungswerte zur Anwendung elektrokinetischer Techniken bei der Schwermetallentfernung aus kontaminierten Böden (MARB et al. 2000)

	Einsatz elektrokinetischer Techniken		Hemmprozess
	günstig	ungünstig	
<b>Schwermetalle</b>	Cd, Zn	As, Pb, Cu, Ni (wg. Komplexbildung)	Geringe Mobilisierbarkeit
<b>Schadstoffspezies</b>	ionisch, löslich	mineralisiert, fest	Geringe Mobilisierbarkeit
<b>TOC-Wert</b>	< 1 %	> 5 %	Hohe Huminstoffadsorption
<b>Tonanteil</b>	> 30 %	< 20 %	Geringer elektroosmotischer Fluss, geringes Wasserrückhaltevermögen
<b>Säureneutralisationskapazität</b>	> 500 mmol/kg	< 100 mmol/kg	Veränderung des Boden-pH-Wertes
<b>Bodeneluatleitfähigkeit</b>	< 0,5 mS/cm	> 2,0 mS/cm	Hoher Stromverbrauch, geringe Feldstärke

Bei den hochmobilen anorganischen anionischen Schadstoffe, wie das stark giftige **Cyanid**, können elektromigrative sowie untergeordnet auch elektroosmotische Effekte angewendet werden. Durch Elektromigration werden die Schadstoffe zur Anode transportiert und können dort abgepumpt oder oxidiert werden (UNRUH, J 1995).

Bei **organischen Verbindungen** werden die im elektrischen Feld auftretenden Effekte Elektromigration (nur bei polaren organischen Verbindungen), Elektroosmose, Bodenerwärmung und Redoxprozesse häufig mit anderen In-Situ-Verfahren kombiniert. Beispielsweise kann man zur Sanierung leichtflüchtiger organischer Schadstoffe mittels Kombination von Bodenerwärmung und Bodenluftabsaugung durchführen (CLARKE et al. 1997). Durch den Effekt der Bodenerwärmung kann der biologische Abbau organischer Schadstoffe oder die Verflüchtigung tiefsiedender organischer Verbindungen beschleunigt werden.

## 580.1.4 Technologische Ausführung

### 580.1.4.1 Elektrodenkonfiguration

Die Größe und Effizienz der elektrokinetischen Effekte wird durch die von der sich ausbildenden elektrischen Feldstärke (Potentialabfall über eine bestimmte Strecke) bestimmt. Bei der Anwendung der elektrokinetischen Sanierungstechniken wird ein möglichst homogenes elektrisches Feld mit geradlinigem Strömungsverlauf angestrebt, um eine gleichmäßige und damit möglichst kurze und kostengünstige Sanierung aller Bodenbereiche zu erzielen. Da die Feldstärke außerhalb der Elektrodenverbindungsleitungen stark abnimmt, müssen die Elektroden bis in die Tiefe eingebaut werden, bis zu der der Bodenkörper saniert werden soll. Ein homogenes Feld wird durch die Verwendung von flächigen sowohl horizontal als auch vertikal eingebauten Elektroden (Plattenelektroden) erreicht, mit dem der sanierende Bodenkörper voll umschlossen ist. Bei größeren Schadensfällen mit Sanierungstiefen von mehreren Metern werden aus wirtschaftlichen Gründen und aufgrund der wesentlich günstigeren Prozesswasserkreislaufführung jedoch am häufigsten stabförmige Elektroden mit Brunnsystem eingesetzt. Diese führen zur Ausbildung von radialen elektrischen Feldern, so dass bei großflächigen Sanierungsmaßnahmen mehrere Reihen von Anoden- und Kathoden verwendet werden sollten, die aufgrund der gekrümmten Feldbahnen aber räumlich versetzt angeordnet werden sollten. Neben der reihenförmigen Anordnung wurden u.a. auch hexagonale Konfigurationen (ALSHAWABKEH et al. 1999) eingesetzt. Um ein hohes elektrisches Feld und damit eine hohe Sanierungsgeschwindigkeit zu erzielen, sollten die Elektrodenabstände so weit wirtschaftlich vertretbar möglichst gering sein. In den publizierten Pilotsanierungsmaßnahmen wurden Elektrodenabstände von 1,5 m bis 15 m und Feldstärken von 10 bis 100 V/m angewandt (ZORN et al. 2000, LAGEMANN et al. 1989, ALSHAWABKEH et al. 1999 etc.). Aus Sicherheitsgründen sollte die angelegte Spannung 500 V nicht überschreiten.

### 580.1.4.2 Elektrodenmaterial

Als Anodenmaterial sollten chemisch inerte und elektrisch leitende Medien wie Graphit, beschichtetes Titan oder Platin verwendet werden, um eine Auflösung der Elektrode zu verhindern und um einer unerwünschten Bildung von Korrosionsprodukten in einer sauren Umgebung entgegenzutreten. Unter bestimmten Umständen ist es sinnvoll, Opferanoden an der Anode einzusetzen. So wurden bei der Umsetzung des Testfeldes „Hammerwerk Söllingen“ bewusst Opferelektroden verwendet, um mit Hilfe des freigesetzten Eisens eine Reduktion von kanzerogenem Chromat zu erreichen (HAUS & CZURDA 2000).

Als Kathodenmaterial kann dagegen jedes leitfähige Material verwendet werden, das unter basischen Bedingungen nicht korrodiert. Die Elektrodenkonstruktion muss so umgesetzt werden, dass ein ausreichender elektrischer Kontakt zum Untergrund und ein Austausch von Wasser und Ionen gewährleistet ist.

Aufgrund der an den Elektrodenflächen ablaufenden elektrochemischen Redoxprozesse wird das Elektrodenwasser elektrolytisch gespalten. An der Anode entsteht Säure und an der Kathode Lauge, die neutralisiert werden müssen. Neben der Neutralisierung erfordert eine großtechnische Anwendung schadstoffspezifische Systeme, die die Entfernung (Sorption, Fällung etc.) der im Elektrodenwasser angereicherten Kontaminanten aus dem Prozesswasser und eine Kreislaufführung ermöglichen.

Im Rahmen der Lasagna Technologie werden zur Kammerung der Prozesswässer ionensensitive Elektroden eingesetzt (Virikutyte, J., M. Sillanpaa, et al. 2002).

Bei der Dekontamination von Schwermetallen sollte beachtet werden, dass durch den Eintrag der an der Kathode entstehende Lauge in den Bodenkörper verhindert wird, da eine Alkalinisierung des Bodenkörpers zur Ausfällung schwerlöslicher Hydroxide führt. In Verbindung mit ausgefälltem Kalk werden dadurch die Bodensporen verstopft und der Sanierungsprozess kommt zum Erliegen. Zum anderen kann es beim Anlegen der Spannung durch die an der Anode elektrolytisch erzeugte Säure zur Absenkung des pH-Wertes im Boden und zur einer Aufkonzentrierung der Schwermetallanteile im Bodenwasser (erhöhte Mobilität der Schwermetalle)

kommen, die zu einem völligen Erliegen des Bodenlebens führt. Abgesehen von Böden mit sehr hoher Pufferkapazität, die mit sehr mobilen Schadstoffen belastet sind, muss das Elektrodenwasser neutralisiert werden, um eine Veränderung des Bodenmilieus zu unterbinden (MARB et al. 2000).

#### 580.1.4.3 Zugabe von Additiven

Durch Zugabe von Additiven in die Elektrodenpflüssigkeit kann eine Optimierung der elektrokinetischen Verfahren erreicht werden. Die Mobilisierung von z.T. mineralisierten schwerlöslichen Schwermetallen ist durch den Einsatz von meist säurehaltigen Extraktionsmitteln möglich, die jedoch in Folge einer starken Absenkung des pH-Wertes im Boden zur einer massiven Veränderung der Bodenmilieus führen können (s.o.). Zur Neutralisation der an der Kathode anfallenden basischen Hydroxidionen wird vor allem Essigsäure diskutiert (ALSHAWABKEH et al. 1999). Des weiteren kann durch Zufuhr von Nährstoffen und Mikroorganismen in den Untergrund oder in die oberirdische Aufbereitung der Abbau von organischen Verbindungen erreicht werden (MARB et al. 2000).

#### 580.1.5 Entwicklungsstand / Stand der Technik

Elektrokinetische Sanierungsverfahren befinden sich derzeit noch weitestgehend in der Erprobungs- und Entwicklungsphase und sind bisher nur in Pilotversuchen eingesetzt worden. Die vorliegenden Veröffentlichungen berichten überwiegend von experimentellen Untersuchungen im Feld- und Technikumsmaßstab, die zumeist im Rahmen staatlich oder privat geförderter Forschungsvorhaben finanziert wurden.

Eine Reihe wesentlicher Fragestellungen zum elektrokinetischen Schadstofftransport sind noch ungeklärt und betreffen insbesondere

- den Einfluss von Inhomogenitäten auf den örtlichen Wirkungsbereich (Tiefe, Fläche),
- die Abschätzung des Wirkungsgrades durch Modellrechnungen,
- die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Bindungsform des Schadstoffes sowie vom Bodentyp,
- die Elektroden für den praktischen Feldeinsatz (Material, Konstruktion),
- die Kombinationsmöglichkeiten mit anderen, prozessfördernden Maßnahmen (Hydraulik, Mikrobiologie, Temperatur, transportfördernde Reagenzien).

Die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet elektrokinetischer Verfahren ist in einer Vielzahl internationaler Fachzeitschriften veröffentlicht und wird u.a. vom amerikanischen Energieministerium (U.S. DOE), der amerikanischen Umweltbehörde (U.S. EPA), den U.S. Sandia National Laboratories, der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) sowie internationaler Großunternehmen gefördert. Eine Reihe wesentlicher Fragestellungen wurden im Rahmen eines Verbundvorhabens des deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), bearbeitet.

Neben der Optimierung und wissenschaftlichen Bearbeitung der elektrokinetischen Grundverfahren befinden sich Kombinationen mit eingeführten In-situ-Verfahren in der Entwicklung, die das sanierungsspezifische Schadstoffspektrum erheblich erweitern werden. Gerade für geringlösliche Kohlenwasserstoffkontaminationen (NAPL) in geringdurchlässigen Böden ist die Kombination mit mikrobiologischen Verfahren ein vielversprechendes Entwicklungsgebiet.

## 580.1.6 Rechtliche Einordnung und Genehmigungsanforderungen

Die zu erarbeitenden umweltrechtlichen Genehmigungs- und Zulassungsverfahren müssen die Gesetzesvorgaben des BImSchG, BNatSchG und des WHG sowie des KrW-/AbfG und des BBodSchG berücksichtigen. Darüber hinaus sind für die Installation der Anlagen vergleichbare Vorschriften aus dem Tief- und Brunnenbau sowie die gesetzlichen Anforderungen an den Gesundheits- und Arbeitsschutz sicherzustellen.

Bei der elektrokinetischen Bodensanierung wird ein Wassertransport und Stofffluss zwischen zwei Elektroden im Boden verursacht. Sofern gem. § 3 Abs. 1 Nr. 6 sowie § 3 Abs. 2 Nr. 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) ein Eingriff in das Grundwasser (Einleitung und Wassertransport in der gesättigten Zone sowie Förderung von Grundwasser) erfolgt, ist im Rahmen der Entwurfs- und Genehmigungsplanung die Beantragung einer wasserrechtlichen Erlaubnis nach § 2 WHG bei der zuständigen Unteren Wasserbehörde erforderlich. Je nach wasserwirtschaftlicher Bedeutung (Grundwassergefährdung) ist im Einzelfall ein förmliches Erlaubnisverfahren oder ein nichtförmliches wasserrechtliches Erlaubnisverfahren durchzuführen.

Die Aufbereitung des Prozesswasser (kontaminierte Elektrodenflüssigkeit) erfolgt in Anlagen gemäß § 19 g WHG, wonach Anlagen zum Lagern, Abfüllen, Herstellen und Behandeln wassergefährdender Stoffe sowie Anlagen zum Verwenden wassergefährdender Stoffe im Bereich der gewerblichen Wirtschaft und im Bereich öffentlicher Einrichtungen so beschaffen sein müssen und so eingebaut, aufgestellt, unterhalten und betrieben werden, dass eine Verunreinigung der Gewässer oder eine sonstige nachteilige Veränderung ihrer Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Das gleiche gilt für Rohrleitungsanlagen, die den Bereich eines Werksgeländes nicht überschreiten. Eine wasserrechtliche Eignungsfeststellung ist nicht erforderlich da sich die Prozessflüssigkeiten im Arbeitsgang befinden (§ 19h Abs. 2a WHG).

Wegen des erheblichen Interesses der Allgemeinheit an einer Bodensanierung, wird der Betrieb einer elektrokinetischen Sanierungsanlage i.d.R. auf der Grundlage des § 22 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG zulässig sein, auch wenn er für einen befristeten Zeitraum zu erheblichen Nachteilen für Tiere oder Pflanzen führt. Sicherheitsrelevante Aspekte beim Einleiten von Strom in den Untergrund sind in jedem Fall zu beachten (vgl. Kap. 58.1.4.1).

## 580.2 Kostenermittlung

Da sich elektrokinetische Sanierungsverfahren derzeit noch weitestgehend in der Erprobungs- und Entwicklungsphase und bisher überwiegend im Rahmen von staatlich oder privat geförderten Modellprojekten durchgeführt wurden, können bisher keine verallgemeinerbaren Kostenansätze ermittelt werden.

Grundsätzlich sind bei der Anwendung von elektrokinetischen Sanierungsverfahren folgende Leistungsbereiche bei der Kostenermittlung zu berücksichtigen (MARB et al. 2000, HAUS et al. 2002):

- Voruntersuchungen
- Baumaßnahmen (Brunnen etc.), Installation und Vorhalten der zur Sanierung notwendigen Einrichtungen, Geräte und Maschinen: (Elektroden, Generatoren, elektrische Systeme, Überwachungsanlagen, Spüleinrichtungen, Tanks, Pumpen)
- Energiekosten (Strom etc.)
- Wartung und Betreuung der Anlage (Personal)
- Sanierungsbegleitende Probenahme und Analytik
- Entsorgung der Reststoffe (Abwasser, Filter, Schlämme, etc.).

Die in Labor- und Technikumsversuchen ermittelten Stromverbrauchszahlen variieren sehr stark in Abhängigkeit von Art des Schadstoffes sowie Bodenbeschaffenheit in einer Größenordnung von Höhe von 10-700 kWh/m<sup>3</sup> (HAUS et al. 2002). Die Höhe der Schadstoffgehalte sind hierbei von untergeordneter Bedeutung.

Die bisher in Kostenmodellen ermittelten Einheitskosten pro Tonne variieren sehr stark in Abhängigkeit von Schadstoff, Untergrund und Modellcharakter (Elektrodenanordnung etc.). Die kalkulierten Gesamtsanierungskosten liegen nach (HAUS et al. 2002, MARB et al. 2000, ALSHAWABKEH et al. 1999, UNRUH, J 1995) bei ca. 40 – 200 Euro/m<sup>3</sup>. Für chromatkontaminierten Boden wurden je nach Bodenbeschaffenheit, Fläche und Kontaminationstiefe Gesamtsanierungskosten zwischen 49 und 105 Euro /t ermittelt (THORNTON & SHAPIRO 1995, ALSHAWABKEH et al. 1999).

### 580.3 Literatur

- Acar, Y.B. & Alshawabkeh, A.N. (1993): Principles of Elektrokinetik Remediation, Environ.Sci.Technol., 27 (13): 2638-2647.
- Alshawabkeh, A.N., Yeung, A.T. & Bricka, M.R. (1999): Practical Aspects of In-Situ Elektrokinetik Extraction, J.Environ.Eng., 125(1): 27-35.
- Clarke, R. L.; Lagemann, R.; Smedley, S. I. (1997): Some Practical Applications of Integrated Elektrokemikal Techniques Used on Reme-diation, Recycling and Resource Recovery. 1. Elektrokinetik Treatment of Soils and Sediments. Geokinetics International Inc., Präsentation auf der Elektrokemikal Processing 1997 Conference, gesponsert von ICI und EA Technology, Barcelona, 14. - 18. April 1997
- Haus, R. & Zorn, R. (1998): Elektrokinetische In-situ-Sanierung kontaminierter Industriestandorte; In: Czurda, K. & Szabo, I. [Eds.]: Abfallentsorgung und Altlastensanierung: 93-118.
- Haus, R. & Czurda, K. (2000): Field Scale Study on In-situ Elektrokemikal Remediation, Proc. ConSoil 2000, 18-22 September 2000, Leipzig, Germany: 1052-1059, London.
- Haus, R. (2002): Elektrokinetische Bodensanierung, Sch. Angew. Geol. Karlsruhe; Karlsruhe, 63, 512 S.; Karlsruhe.
- Haus, R., Zorn, R., Czurda, K., Terfehr, S. (2002): Elektrokinetische In-situ-Sanierung - Stand der Technik, Planung, Implementierung. Herausgegeben vom Arbeitskreis Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungsmethoden; Altlastenforum Baden-Württemberg e.V., Schriftenreihe, Heft 7, 2002.
- Marb, C., Schmid, M. Peter, M. & Sagl, S. (2000): Elektrokinetische Reinigung kontaminierter Böden – Abschlussbericht zum 30.09.2000, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Abfalltechnikum Augsburg 2000.
- Lagemann, R.; Pool, W.; Seffinga, G. (1989): Electro-Reclamation: Theory and Practice. Chem. Ind., 9 (1989), S. 585 – 590.
- Lagemann, R. (1993): Elektrokemikal Reclamation – Applications in the Netherlands, Environ.Sci.Technol., 27(13): 2648-2650.
- Steger, H., Zorn, R., Haus, R. & Czurda, K. (2001): Removal of tetrachloroethylene from fine-grained soils by elektrokinetik processes. - In: Czurda, K., Haus, R., Kappeler, C. & Zorn, R. (Hrsg.): Proc. EREM 2001 3. Symposium on Elektrokinetik Remediation, April 18 - 20, 2001, Karlsruhe. Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, 63: 25/1-25/14; Karlsruhe.

- Thornton, R.F. & Shapiro, A.P. (1995): Modeling and Economic Analysis of In-situ Remediation of Cr(VI)-Contaminated Soil by Electromigration, In: Tedder, D.W. & Pohland, F.G. [Eds.]: ACS Symposium Series 607: Emerging Technologies in Hazardous Waste Management V: 33-47; Washington/DC (ACS).
- Unruh, J (1995): Elektrochemische Umweltschutzverfahren - Eine Übersicht. In: Zielonka, A. (Hrsg.) Jahrbuch Oberflächentechnik, Band 51, Metall Verlag, Heidelberg, (1995), S. 331 – 364
- Virkutyte, J., M. Sillanpaa, et al. (2002): Electrokinetic soil remediation -- critical overview. Science Total Environment 289: 97-121
- Zorn, R., Haus, R., Steger, H. & Czurda, K. (2000): Elektrokinetische Bodensanierung: Einsatzmöglichkeiten, Anwendungsbereiche und Erkundungsanfordernisse. - LFU Bayern, Fachtagung "Elektrokinetische Verfahren - Methoden zur Altlastensanierung", Augsburg, 22.11.2000: S. 41-52.
- Zorn, R., Steger, H., Haus, R., Czurda, K. & Penz, M. (2001): Elektrokinetische Bodensanierung - Einfluß auf die Standfestigkeit tonhaltiger Böden - In: Czurda, K., Fernandez-Steger, T. & Roehl, K.E. (Hrsg.): 13. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, 2.-6. April 2001, Karlsruhe: 243-244; Essen (Verlag Glückauf).
- Zorn, R., Steger, H., Haus, R. & Czurda, K. (2001): Elektrokinetik - Einführung, Ergebnisse aus Labor- und Feldversuchen - In: Burkhardt, G., Egloffstein, T. & Czurda, K. (Hrsg.): Altlasten 2001 - Neue Verfahren zur Sicherung und Sanierung, Beiträge zum Seminar 20.-21.06.01 in Karlsruhe, Band 4: 71-82; Karlsruhe (ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt).

#### 580.4 Information über Leistungsanbieter

Leistungsanbieter sind anhand einschlägiger Referenzen auszuwählen.

