

Wirtschaftliche und ingenieurtechnische Betrachtungen zur Altlastensanierung durch Grundwasser- und Bodenluftreinigung

Herrn Prof. Dr.-Ing. Drs. h. c. Jörg Schlaich zum 60. Geburtstag gewidmet

Aufgrund begrenzter Neuansiedlungsflächen werden vormals industriell oder gewerblich genutzte Flächen heute rekultiviert. Ein wesentlicher Aspekt dieser Vorhaben sind mögliche Altlasten infolge von früher in Produktionsprozessen angewandten Betriebs- oder Hilfsstoffen wie Mineralöle und leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe (z. B. leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe), die in den Boden oder das Grundwasser gelangen konnten.

Altlastensanierung zur Beseitigung dieser Stoffe wird seit ca. 10 Jahren aktiv betrieben. Zunächst stand hier das Grundwasser als oberstes Schutzgut im Vordergrund. Später wurde durch behördliche Vorgaben auch der Boden selbst erfaßt.

Sowohl die Erfassung („Erkundung“) als auch die Beseitigung („Sanierung“) der Belastungen sind in der heutigen Praxis zeitlich und finanziell nicht abzuschätzen. Anhand eines repräsentativen Beispiels werden die gängige Sanierungspraxis und die damit verbundenen Folgen aufgezeigt.

Reclamation of „pollution legacies“ by decontamination of groundwater and soil – economical and technical aspects. *The scarcity of land available for new developments means that former industrial or commercial areas are increasingly being recultivated. An important aspect of these projects are existing „pollution legacies“ due to operating or auxiliary substances, such as mineral oils or volatile organic compounds, which have penetrated into the soil or into the groundwater.*

The reclamation of contaminated sites has now been pursued actively for about 10 years. Initially, groundwater was given top priority as a protected environmental resource. Later on, the legal provisions also covered the decontamination of soil.

In terms of time and financial expenditure it is not possible today to make a precise statement with regard to the determination of pollution load („exploration“) and the progress of decontamination work. The current practice in this field of remedial engineering is illustrated by a typical project and the resulting conditions.

1 Einleitung

In der Stuttgarter Zeitung vom 06. 09.1993 wird der Tübinger Oberbürgermeister zitiert: „Die

Stadt Tübingen kann die Anordnung des Landratsamtes zur Bodensanierung des ehemaligen Metropol-Geländes aus Geldmangel nicht durchführen. Wir müssen mit Altlasten leben lernen.“

Der Hintergrund für diese Fragestellung ist: Alleine für die Erkundung dieses ehemaligen Gaswerksgeländes wurden bereits 2 Mio. DM ausgegeben. Die weiteren Arbeiten zur Sanierung werden auf 6,5 Mio. DM geschätzt: das Feststellen des Schadens und die Ermittlung von dessen Größe betragen hier 30 % des späteren Sanierungsaufwandes! Ein Kostenvoranschlag für die geplante Neunutzung als Parkhaus mit 445 Stellplätzen beläuft sich auf 13 Mio. DM. Jeder Stellplatz verteuert sich damit um 65 %, die für die Sanierung des Geländes im Vorfeld der eigentlichen Bauarbeiten aufgebracht werden müssen. Das Verhältnis Sanierungs- (incl. Erkundung) zu Neubaukosten liegt bei 1 : 1,5.

Der Sanierungsalltag wird jedoch nicht von spektakulären Fällen der öffentlichen Hand wie z. B. den Modellstandorten des Landes Baden-Württemberg oder dem oben zitierten Fall bestimmt. „Standardarbeiten“ für ausführende Büros und Firmen sind die Erkundung und die anschließende Sanierung z. B. über „Bodenluftabsaugungen“ und „Grundwasserreinigungen“, die mittelständische Industriebetriebe aufgrund des ehemals üblichen Umganges mit Lösungsmitteln einrichten müssen. Für die Industriebetriebe ist hier die Frage nach den zu erwartenden Kosten für Erkundung und Sanierung entscheidend, um die nötigen Finanzmittel in einem Kostenplan bereitstellen zu können. Auch laufende Sanierungsvorhaben werden

in Zeiten knapper Finanzen überprüft. Jedoch ist heute „Wirtschaftlichkeit“ kein Kriterium für den „Erfolg“ einer Sanierung. Eine Sanierung gilt nur bei dauerhafter Unterschreitung „theoretisch“ festgelegter Sanierungszielwerte als erfolgreich. Diese werden z. B. nach [1], [2], [3] festgelegt zu:
– 0,5 mg/m³ CKW in der Bodenluft der ungesättigten Zone
– 0,01 bis 0,02 mg/l CKW im Grundwasser.

Wirtschaftliche und technische Gesichtspunkte bleiben außer acht, denn diese geringen Restkonzentrationen sind von den derzeitigen Sanierungsmethoden auch nach jahrelangem Betrieb nicht erreichbar. Ein Kostenvoranschlag – wie er bei jedem Bauvorhaben üblich ist – kann auf dieser Basis nicht erstellt werden, die Gesamtkosten führen ins Uferlose.

In vorliegendem Aufsatz sollen die bei einer Standardsanierung eines Schadens infolge von Lösemitteln, meist leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe („CKW“), entstehenden Kosten und ihre Gründe aufgezeigt werden. Beispielhaft wird dies an einer Bodenluftabsaugung, kombiniert mit einer Grundwasserreinigung, dargestellt. Es wird anhand einer Wirtschaftlichkeitsberechnung die heutige Vorgehensweise veranschaulicht und diskutiert.

2 Sanierungstechniken

Zur Nachsorge einer Untergrundverunreinigung infolge leichtflüchtiger Schadstoffe wird zuerst eine Bodenluftabsaugung für die ungesättigte Bodenzone installiert. Bei einer Ausbreitung bis in den Aquifer hinein muß zusätzlich eine hydraulische Grundwassersanierung erfolgen (Bild 1).

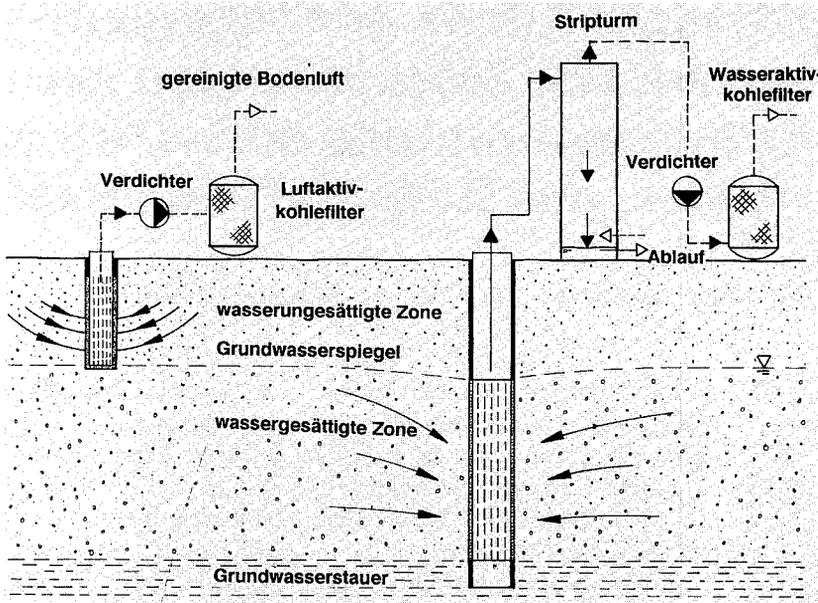


Bild 1. Funktionsschema von Bodenluftabsaugung und Grundwasserdekontamination
 Fig. 1. Flow diagram of air evacuation and groundwater decontamination

Über Unterdruckerzeuger (Bild 2) wird in der ungesättigten Zone des Untergrunds die in den Poren vorhandene Bodenluft über Filterrohre abgesaugt. Abhängig von der Durchlässigkeit des Untergrunds liegen die Unterdrücke bei 50 bis 250 mbar. Die Anwendung von Vakuumpumpen bei sehr dichten, tonigen Böden ist aufgrund der enormen Verdichtung und der damit verbundenen Temperaturerhöhung der geförderten Luft selten.

Grundwasser wird durch vollkommene Brunnen über Hochdruckpumpen zur Reinigungseinheit gefördert. Kombinationspegel zur gleichzeitigen Entnahme von Grundwasser und Bodenluft sind möglich.

Üblicherweise wird das verunreinigte Grundwasser in Druckfiltern (Bild 3) direkt über Aktivkohle geführt. Aktivkohle besitzt eine sehr große Oberfläche (900 bis 1200 m²/g). Die Schadstoffmoleküle lagern sich in den Poren der

Aktivkohle an. Man unterscheidet hier zwischen Mikro-, Meso- und Makroporen („innere Oberfläche“). Die theoretische Aufnahmefähigkeit von z.B. mit 100 mg/m³ Perchlorethen belastetem Wasser liegt bei 6 Gew.% (20 °C). Sie wird durch Verdrängungsprozesse unter den sonstigen Wasserinhaltsstoffen wie Schwebstoffe und Humine sowie dem nie in Reinform vorliegenden Lösemittel auf ca. 1 bis 2 Gew.% herabgesetzt.

Ab größeren Volumenströmen von 5 m³/h aufwärts wird mit dem bekannten Stripverfahren gereinigt (Bild 4), da Aktivkohle in Direktadsorption hohe Betriebskosten verursacht. Beim Stripverfahren wird das Wasser am Kopf eines Turmes verdunstet und damit in intensiven Kontakt zu der im Gegenstrom geführten Luft gebracht. Die Schadstoffe können je nach Dampfdruck und Verteilungsgleichgewicht aus dem Grundwasser in die Gasphase übertreten.

In Baden-Württemberg ist eine Abluftreinigung für die Strippluft zwingend. Der Anteil an leichtflüchtigen Schadstoffen im Wasser beträgt in der Regel zwischen millionstel und milliardstel Gewichtsteilen (1–1000 µg/l). In der Strippluft hingegen liegt er um das 15fache höher. Darüberhinaus ist die Adsorptionskinetik in der Gasphase deutlich besser. Somit kann durch den Verfahrensschritt der Stripplung der Verbrauch an Aktivkohle verringert werden.

Für die Abluftreinigung werden Wechselbehälter eingesetzt, die ein Nettovollvolumen von 0,2 bis 2 m³ aufweisen. Nach ihrer Beladung können die eingesetzten Kohlen gegen Neukohle getauscht werden. Die beladenen Kohlen werden gesammelt und dann zentral aufbereitet.

Bei hohen Schadstofffrachten, die über mehrere Monate anstehen, wird die eingesetzte Luftkohle vor Ort aufbereitet. Die Regenerierung der Luftaktivkohle erfolgt hier mit Heißdampf. Dieser nimmt die Schadstoffe aus der Kohle auf. Nach der Abkühlung des Kondensats können die Lösemittel aufgrund ihrer begrenzten Löslichkeit

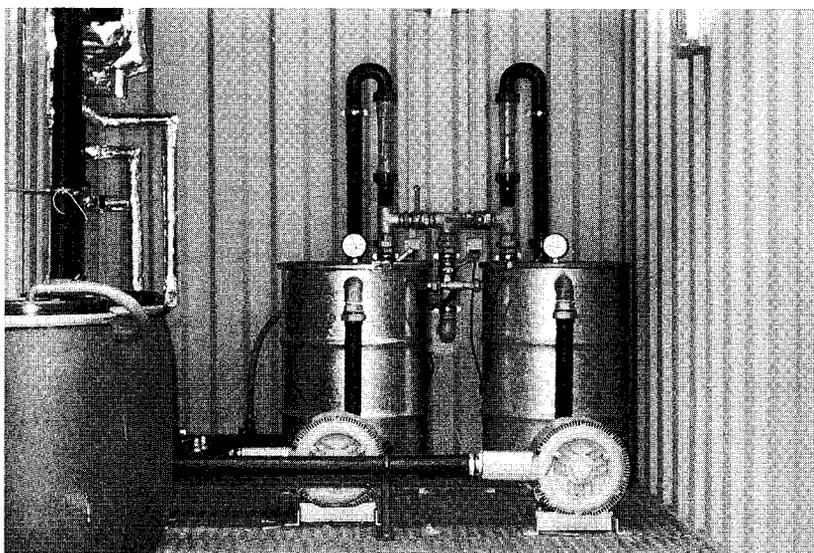


Bild 2. Beispiel für eine Bodenluftabsaugstation
 Fig. 2. Example of an air evacuation unit

in Wasser (ca. 16 mg/l) in einem Schwerkraftabscheider in restbelastetes Wasser und reines Lösemittel abgetrennt werden. Das restbelastete Wasser wird in den Zulauf der Stripanlage zurückgeführt.

Maßgebend für die Wirtschaftlichkeit einer automatischen Aktivkohleregenerieranlage (Bild 5) direkt am Sanierungsort sind die Fixkosten für den Auf-, den Abbau und für den aufwendigen Anschluß der Anlage sowie der hohe Energieverbrauch der Lösemittelrückgewinnung im Vergleich zu dem Kohleverbrauch beim Einsatz von Wechselbehältern.

Dieselben Verfahren werden bei Bodenluftabsaugungen zur Abreinigung der abgesaugten Luft eingesetzt. Die Schadstofffrachten in der Rohluft sind hier um das ca. 10fache höher.

Die Anlagerung von Schadstoffen an Luftaktivkohle hat jedoch den ökologischen Nachteil, daß die Schadstoffe zuerst verlagert und dann aufkonzentriert, aber nicht zerlegt und damit beseitigt werden. Sie hat zudem ihre Grenzen bei Vorherrschen von schlecht an Aktivkohle anzulagernden Komponenten wie z.B. Vinylchlorid und bei hohen Frachten. Möglich ist dann eine oxidative Behandlung des Luftstroms mit Unterstützung eines Kataly-

sators („katalytische Oxidation“). Die Kohlenstoffverbindungen werden flammenlos zu CO_2 und H_2O umgewandelt. Der hohe Energieeinsatz zur Erhitzung des Rohluftstroms auf ca. 400°C wird durch eine Wärmerückgewinnung verringert.

Eine nahezu vollständige Zerlegung von Kohlenwasserstoffverbindungen direkt im Wasserstrom ist ebenfalls möglich. Dies wird mittels UV-Strahlung und Zugabe eines Oxidationsmittels wie z.B. Wasserstoffsuperoxid erreicht. Die Einsatzmöglichkeiten einer „UV-Oxidation“ sind vom Schadstoffspektrum her sehr breit (Pestizide, Deponiesickerwasser, ...), jedoch bewirken andere Wasserinhaltsstoffe wie Eisen und Mangan einen anlagenspezifisch hohen und kostenintensiven Aufwand.

Biofilter können bei biologisch abbaubaren Schadstoffen im Wasser oder der Rohluft eingesetzt werden (z. B. Mineralölkohlenwasserstoffe, aromatische Kohlenwasserstoffe). Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) mineralisieren die Schadstoffe stufenweise zu CO_2 , H_2O und Biomasse. Die Entstehung von Metaboliten bei der Dehalogenierung und ihr Risikopotential muß geklärt sein. Die gezielte Anwendung von biologischen Abbauprozessen bedingt einen großen Spielraum bei der



Bild 3. Wasseraktivkohlefilter mit 10 m^3 Nenninhalt

Fig. 3. Granular activated carbon filter-unit with a nominal capacity of 10 m^3 for groundwater treatment

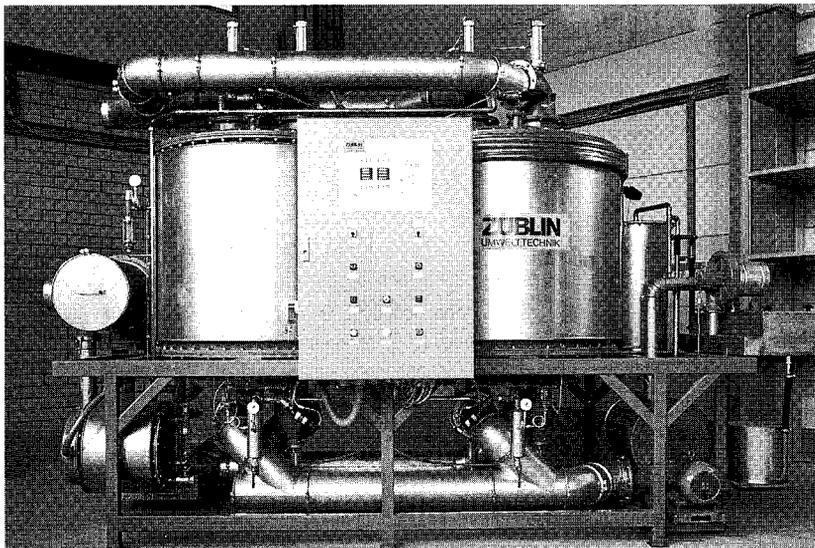


Bild 5. Beispiel für eine automatische Aktivkohleregenerieranlage für $1200\text{ m}^3/\text{h}$ Luftdurchsatz

Fig. 5. Example of an automatic activated carbon regeneration unit designed for an air throughput capacity of $1.200\text{ m}^3/\text{h}$

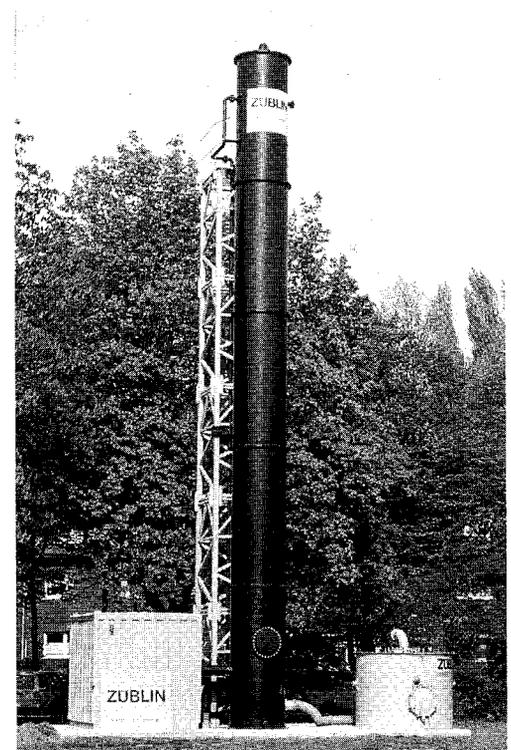


Bild 4. Beispiel für eine Stripanlage mit $40\text{ m}^3/\text{h}$ Wasserdurchsatz

Fig. 4. Example of a tower air stripper with a water throughput capacity of $40\text{ m}^3/\text{h}$

Reinigungsleistung und eine äußerst gleichmäßige Belastung des zu behandelnden Volumensstroms bei genau definierbaren Milieubedingungen.

Die zuletzt genannten Techniken sind auf Einzelfälle beschränkt und werden im folgenden nicht weiter berücksichtigt.

3 Verlauf einer Sanierung

Alle Untergrundsanierungen von leichtflüchtigen Schadstoffen zeigen einen charakteristischen Verlauf: die zunächst hohen Startkonzentrationen bei Sanierungsbeginn klingen rapide auf 10 % bis 20 % der Ausgangsbelastung ab. In einem gut durchlässigen Untergrund wie z.B. Sand kann diese Phase bei einer Bodenluftabsaugung bereits nach 50 Tagen beendet sein. In der Regel können 100 Tage veranschlagt werden. Maximalfälle wie im folgenden Beispiel liegen bei einem knappen Jahr.

In einer zweiten Phase muß dann versucht werden, durch zusätzliche Maßnahmen wie – intermittierender Betrieb (Wechsel zwischen Ruhe- und Betriebsphasen) – zusätzliche Grundwasserabsenkung zur Erweiterung der ungesättigten Zone und zur Erfassung des Grundwassersaumes

– gezielte Belüftung des Untergrunds durch Einpressen von Luft oder Sauerstoff

– Energieeintrag in den Untergrund mittels Schwingungen (z.B. Schallwellen)

– Bodenlockerung
noch weitere Schadstoffe zu mobilisieren und damit die Steigung der Austragskurve wieder zu erhöhen. Zudem muß die Anlagentechnik dem rückläufigen Schadstoffaustrag angepaßt werden.

Selbst mit diesen Techniken läßt sich auch heute das vorgegebene Sanierungsziel für die Bodenluft in einem überschaubaren Zeitraum noch nicht erreichen. Es schließt sich eine langfristige 3. Phase an, bei der über viele Jahre hinweg bei kleinem Austrag nur geringste Konzentrationsverringerungen in der Bodenluft erzielt werden. Wie das Beispiel einer kombinierten

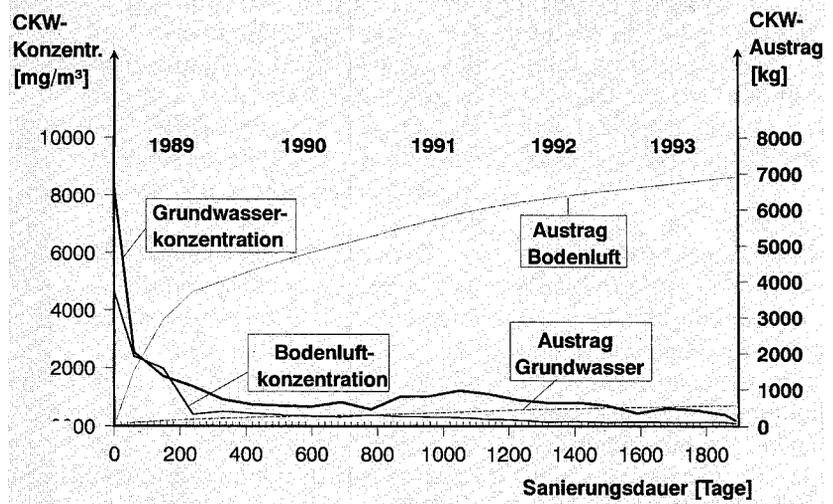


Bild 6. Typische Konzentrationsentwicklung mit Schadstoffaustrag am Beispiel eines langjährigen Sanierungsprojekts

Fig. 6. Typical concentration development with pollutant removal exemplified by a decontamination project carried out over a period of several years

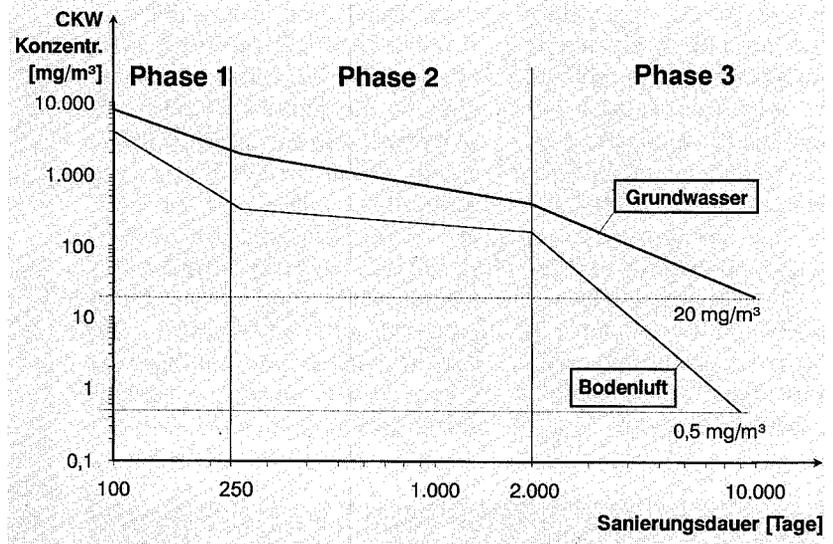


Bild 7. Tatsächlicher (Phase 1 und 2) und extrapoliertes Konzentrationsverlauf (Phase 3) des zitierten Sanierungsbeispiels

Fig. 7. Actual (phase 1 and 2) and extrapolated concentration development (phase 3) of the decontamination example described

Bodenluftabsaugung und Grundwasserreinigung in Süddeutschland mit gut durchlässigem Untergrund zeigt, gilt dies für das Medium Grundwasser gleichermaßen (Bild 6). Es ist eine der ersten umfassenden Altlastenmaßnahmen. Hier wird seit über 5 Jahren saniert.

Der bisherige Sanierungsverlauf für die Bodenluft und das Grundwasser wurde schematisch in die beiden genannten Phasen eingeteilt. Für die kommende 3. Phase haben wir den Sanie-

rungsverlauf begünstigt angenommen, so daß im 25. Sanierungsjahr die vorgegebenen Sanierungszielwerte erreicht werden. Um den asymptotischen Verlauf übersichtlich darstellen zu können, wurde eine logarithmische Skaleneinteilung der Zeit- und der Konzentrationsachse gewählt (Bild 7):

- Phase 1: 0. bis 250. Tag
- Phase 2: 250. bis 2000. Tag (heutiger Sanierungsstand)
- Phase 3: 2000. bis 10000. Tag (extrapoliertes Sanierungsende für das Grundwasser).

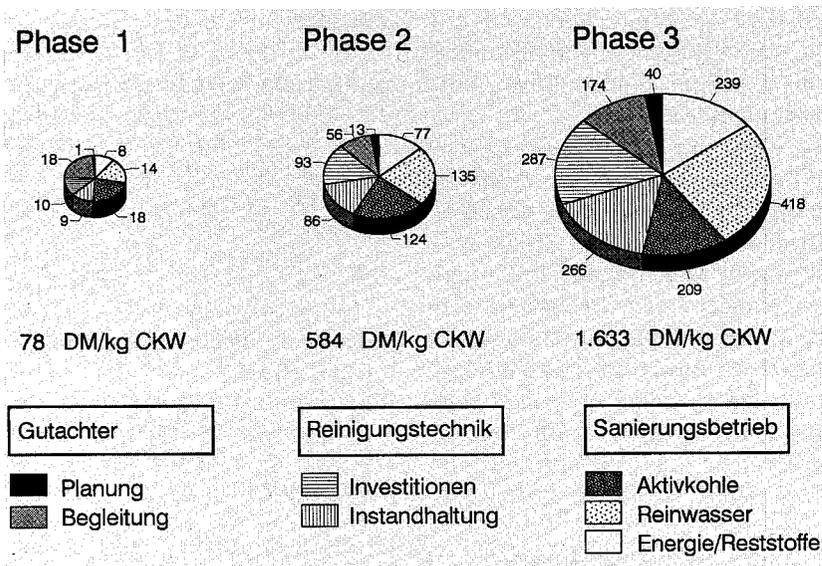


Bild 8. Entwicklung der spezifischen Sanierungskosten in den Phasen 1 bis 3

Fig. 8. Development of the specific decontamination costs in phases 1 to 3

Zu beachten ist, daß durch den doppeltlogarithmischen Maßstab die gewohnte Übersicht über die Betriebszeit und die Konzentrationshöhe verfälscht wird. So werden in der 3. Phase für eine Konzentrationsverbesserung der CKW-Belastung in der Bodenluft von 150 mg/m^3 auf $0,5 \text{ mg/m}^3$ 18 Jahre benötigt, während in der 1. Phase ein Rückgang von 4000 mg/m^3 auf 300 mg/m^3 in einem knappen Jahr erzielt wurde.

Der CKW-Austrag ist in jeder Phase etwa gleich hoch: jeweils ca. 4 t. Dieser Austrag wird zu ca. 90 % über die Bodenluftabsaugung und zu ca. 10 % über die hydraulische Sanierung erzielt.

4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die vorgenannte Tatsache kommt besonders in einer Wirtschaftlichkeitsberechnung der Sanierung zum Ausdruck.

Die Gesamtkosten lassen sich unterteilen in

- Planung (Erkundung, Sanierungskonzeption)
- Sanierungsbegleitung (analytische Überwachung, Dokumentation und Bewertung)
- Investition der Anlagen (Abschreibung und Verzinsung)
- Instandhaltung (Reparatur, Wartung)

– Betrieb (Betriebsstoffe wie Aktivkohle, Energie, Reinwasserabfuhr, Reststoffe).

Am obigen Beispiel können die Kosten für die Abtrennung von einem Kilogramm CKW aus dem Grundwasser und der Bodenluft ermittelt werden: in der ersten Phase werden 78 DM/kg CKW-Austrag aufgewendet. Berücksichtigt ist hierbei eine Verfahrensoptimierung durch eine Vor-Ort-Regenerierung der eingesetzten Luftaktivkohle. In der 2. Phase steigt der Aufwand für den Austrag je Kilogramm CKW auf 584 DM. Hier wurde das Reinigungsverfahren auf die billigeren Luftaktivkohlewechselbehälter umgestellt. In der letzten Phase nehmen die Kosten für den Austrag von einem Kilogramm CKW auf 1633 DM zu (Bild 8). Dieser Endpreis ist nach heutiger Beurteilung gering; er liegt in anderen Fällen je nach geologischen und schadstoffbedingten Randbedingungen bei 3000 DM/kg und mehr [4]. Die Gesamtkosten für das vorliegende Sanierungsbeispiel lassen sich damit auf 9 Mio. DM für 11,5 t CKW-Austrag hochrechnen.

Im einzelnen ergibt sich die folgende Aufteilung in die oben genannten Kostengruppen (Bild 8): Der Kostenanteil des betreuenden Büros für die Planung und für die spätere Sanierungsbegleitung liegt

durch die Inbetriebnahme und die intensive analytische Überwachung in der 1. Phase bei 25 % der Gesamtkosten. Dieser Anteil sinkt im weiteren Verlauf auf ca. 13 %. Dafür steigt der Betrag für die installierte Reinigungstechnik von 24 % auf 34 %; bezogen auf die Gesamtansierungszeit liegt er bei einem Drittel der Gesamtkosten. Der Sanierungsbetrieb erfordert durchgehend etwa 50 % bis 60 %. Während hier zunächst der Aktivkohleeinsatz bzw. die Regenerierung mit 25 % im Vordergrund steht, fällt er im weiteren Sanierungsverlauf auf 10 % zurück. Gleichzeitig tritt die Abfuhr des Reinwassers mit 26 % in den Vordergrund, der daher bei der Anlagenplanung ein hoher Stellenwert eingeräumt werden muß (der Berechnung wurden keine Abwassergebühren von zur Zeit ca. $3,00 \text{ DM/m}^3$ zugrundegelegt. Dies würde die Kostenermittlung überproportional beeinflussen. Es wurde ein Ansatz gewählt, bei dem eine Wiederversickerung bzw. Weiterverwendung als Betriebswasser möglich ist). Der Anteil für die Beseitigung der Reststoffe und für die Energie liegt bei 10 % bis 15 %. Bezieht man diese Kostenanteile wie im Bild 8 auf DM/kg, wird deutlich, wie enorm sie in der 3. Phase ansteigen.

5 Diskussion und Zusammenfassung

Es zeigt sich, daß in nahezu jeder Sanierung eines Schadens infolge von Lösungsmitteln in einer ersten, verhältnismäßig kurzen und intensiv überwachten Phase für geringe Kosten schon 33 % der Schadstoffe ausgetragen werden können. In unserem Beispiel betragen die Kosten für die 1. Phase 5 % der Gesamtkosten. In Phase 2 steht einem Austrag von weiteren 33 % ein Aufwand von 20 % der Gesamtkosten entgegen. 75 % der Gesamtkosten nach heutigen Maßstäben müssen für das letzte Schadstoffdrittel in einer langwierigen 3. Phase aufgewendet werden.

Prinzipiell können Bodenluftabsaugungen immer als Sofortmaßnahmen angesehen werden.

Durch den Transport der Schadstoffe im Grundwasser bilden sich in der Regel großräumige „Belastungsfahnen“; zusammen mit einem geringen Schadstoffaustrag dauert die Reinigung des Grundwassers, welches ein hohes Schutzgut darstellt, sehr lange. Über die rein hydrogeologische und analytische Erfassung hinaus sollte es daher Aufgabe des beratenden Büros sein, Sanierungsanlagen nach dem neuesten Stand zu planen sowie die mit der langen Sanierungsdauer verbundene Kostenentwicklung zu erfassen und darzustellen. Dies setzt die Erfahrung des beratenden Ingenieurs voraus, aus den oft technisch nicht verwertbaren Beschreibungen des Schadensfalles exakte Randbedingungen zu formulieren, mit denen ein optimales Verfahren auf der Grundlage eines erwarteten Sanierungsverlaufes ausgewählt und dimensioniert werden kann.

Wie oben für die Phase 1 errechnet, können nach dem heutigen Stand die gängigen Verfahren in bezug auf eine Kosten-Nutzen-Relation als wirtschaftlich beurteilt werden. Zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung des Austrages und damit zur Verringerung der Sanierungszeit sind in Phase 2 erforderlich und auch wirtschaftlich vertretbar. Die oben beschriebenen

Ansätze erfordern jedoch bis zu ihrem praktischen Einsatz noch umfangreiche konstruktive Entwicklungsarbeit.

Wie und unter welchen Bedingungen die 3. Sanierungsphase beendet werden kann, ist unbefriedigend. Durch die Extrapolation in unserem Sanierungsbeispiel, das im Vergleich zu anderen Sanierungsvorhaben schon relativ lange betrieben wird, erscheint die Beurteilung des „Erfolges“ einer Sanierung alleine anhand der eingangs genannten „Sanierungszielwerte“ fragwürdig. Es müssen weitere Kriterien wie

- nutzungsgerechte Sanierung
- umfeldbezogene Sanierung
- ökologische Gesichtspunkte
- ökonomische Gesichtspunkte
- Schadensbilanz (falls nachvollziehbar)

zur Beurteilung herangezogen werden.

Ein Sanierungsziel muß so formuliert werden, daß es mit vertretbarem Aufwand erreicht werden kann und nicht wirtschaftlich unangemessen ist. Um einen möglichst weitreichenden Erfolg mit den vorhandenen, aber begrenzten Finanzierungsmitteln zu erzielen, ist mehr Flexibilität bei der Festlegung von Sanierungszielen für die Behebung von Altlastenschäden gefordert.

Literatur

- [1] Regierungspräsidium Stuttgart, Januar 1991: Ermittlung, Erkundung und Sanierung von CKW-Verunreinigungen und anderen Schadensfällen („CKW-Fibel“).
- [2] Rundschreiben vom 10. 01. 1989 vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft: Behandlung von Grundwasserverunreinigungen durch leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe.
- [3] Verwaltungsvorschrift zu § 77 des Hessischen Wassergesetzes für die Sanierung von Grundwasser- und Bodenverunreinigungen vom 05. 11. 91.
- [4] Högg, P., Dittmar, Chr., Weber, W.: Kostenbetrachtung bei technisch aufwendigen Bodenluftabsaugmaßnahmen: Kostenverläufe – Zusammenhänge – Ursachen, Grundwassersanierung 1993, IWS Schriftenreihe Band 18, S. 187

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Hans Gropper, Gruppe Altlasten und Umweltgeologie, TÜV Energie und Umwelt GmbH, NL Stuttgart, Raiffeisenstraße 30, 70794 Filderstadt; Dipl.-Ing. Peter Högg, Züblin Umwelttechnik GmbH, Albstadtweg 1, 70567 Stuttgart