

# Erfahrungen bei der Anwendung von Maßnahmen zur Prozessintensivierung von in-situ Verfahren im Rahmen der Sanierung eines ehemaligen Gaswerksstandortes

Rolf Thamm, Klaus Meinhardt, Michael Eclart, Rolf Zurl, Bernd Voland

## 1 Zusammenfassung

Am Standort Plauen der heutigen WVP-Wärmeversorgung Plauen GmbH wird seit dem September 1998 eine Grundwassersanierungsanlage betrieben. Unter komplizierten geologischen und bautechnischen Bedingungen wurde ein Mehrphasenkonzept zur Entfernung gaswerlztypischer Kontaminanten aus der gesättigten und ungesättigten Bodenzone entwickelt. Im Rahmen der Sanierungsdurchführung konnten, unterstützt durch das Förderprogramm LIFE 96 der Europäischen Union, eine Reihe von innovativen Technologien zur Intensivierung des Sanierungsprozesses getestet werden.

Die Anwendbarkeit und die Zweckmäßigkeit der getesteten Verfahren wurde im Bezug zu den am Standort vorherrschenden Bedingungen bewertet.

Die Bewertung der entsprechenden Verfahren basiert auf den Ergebnissen von:

- umfangreichen Feldversuchen
- tiefgründigen Literaturrecherchen und
- komplexen modelltechnischen Untersuchungen.

Die Verfahren Reinfiltration von erwärmtem und gereinigtem Grundwasser und Aktivierung von gesteuerten Austauschprozessen in der Aerationzone führen zu einer deutlichen Verbesserung der Sanierungsleistung der Gesamtanlage.

## 2 Standort und Historie

1854 begann die Produktion von Stadtgas in Plauen in der Hammerstraße. Auf dem Betriebsgelände der heutigen WVP-Wärmeversorgung Plauen GmbH, ein Tochterunternehmen der *envia* Mitteldeutschen Energie AG (*enviaM*), entstand 1912 das Gaswerk II in der Hammerstraße.

Das Prinzip der Gasherstellung beruhte auf der Erhitzung von Stein- oder Braunkohle in sogenannten Retorten auf etwa 1.000 °C. Dabei entstanden Koks und Stadtgas, das gekühlt und gereinigt wurde. Als Nebenprodukt dieses Prozesses sind vor allem Teere zu nennen, die zum Teil für den Straßenbau verwendet wurden.

Im Ergebnis dieser Produktion und im Rahmen des Umgangs mit den Haupt- und Nebenprodukten kam es über die Jahre zum Eintrag großer Mengen an Teeren und mit organischen Stoffen belasteten Wässern in das umgebende Erdreich und in das Grundwasser am Standort.

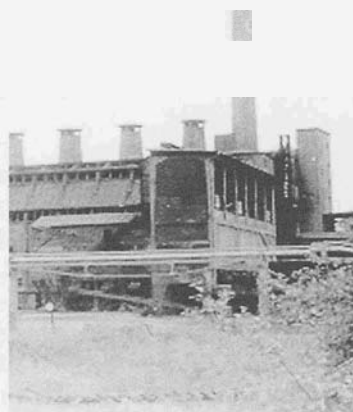


Abbildung 1: Ansicht des Gaswerkes vor dem Abbruch

1976, als in Plauen die Umstellung von Stadtgas auf Ferngas erfolgte, stellte das Gaswerk seinen Betrieb ein.

Beim bodengleichen Abtrag der Altanlagen nach Stilllegung des Gaswerkes verblieben teilweise Kanäle, kontaminiertes Erdreich und Fundamente, besonders an bautechnisch sensiblen Bereichen, im Boden. Bekannte Kontaminationsschwerpunkte wie Teergruben und Lagerbereiche wurden im Zuge des Rückbaus der Altanlagen beseitigt.

Im Jahre 1991 begann die umfassende Untersuchung des Gesamtgeländes im Bereich der Hammerstraße in mehreren Untersuchungsetappen zur Feststellung des Ausmaßes der am Standort vorhandenen Schädigung der Umwelt durch gaswerlztypische Kontaminanten.

Im Jahre 1994 wurde eine ausführliche Zustandsbeschreibung [1] der Belastungssituation für den Standort vorgelegt und Vorschläge zur Ableitung eines Sanierungskonzeptes unterbreitet.

## 3 Kontaminationssituation

Das Schadstoffpotential umfasst Phenole, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), BTEX-Aromaten sowie teilweise Kohlenwasserstoffe und in Größenordnungen Ammonium. Insgesamt wurde ein Bodenvolumen von ca. 20.000 m<sup>3</sup> als dringend sanierungsbedürftig ausgewiesen.

Schwermetallbelastungen konnten im Boden und im Grundwasser in keiner flächenhaft relevanten Größenordnung nachgewiesen werden.

Die Erfassung der Kontaminationssituation ging ein-

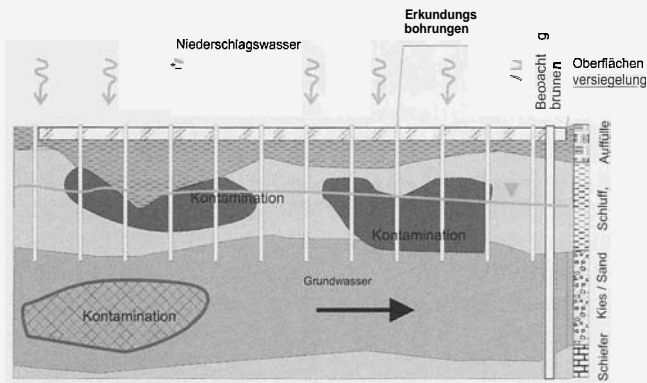


Abbildung 2: Geologie und Kontamination

her mit der Bewertung des Gefährdungspotentials in bezug auf die Schutzgüter Boden und Grundwasser. Die geologische Situation und die Lage der Kontaminationsherde kann anhand der Abbildung 2 demonstriert werden.

Die gaswerlstypischen Kontaminanten konzentrieren sich auf fünf Schwerpunktbereiche im Gelände im Umfeld von ehemaligen Verarbeitungs- und Umschlag-einrichtungen.

Als Hauptsanierungsbereiche wurden folgende Bereiche ausgewiesen:

- Teer- und Ammonialzruben
- Gassaugeranlage / Vorkühler
- Benzolofen / Gloczengasbehälter
- Scheibengasbehälter
- Benzolübergabe / DK/VK Tankstelle.

Neben der Bewertung der Verteilung der festen Phasen im Boden und der Lage der Kontaminations-schwerpunkte zu in Nutzung befindlichen Bauwer-zen wurde besonderes Augenmerk auf die Ausbrei-tung der mobilen Schadstoffe über das Grundwasser gelegt. Zur Nachbildung der Grundwasserhydraulik wurde ein mathematisches Modell mit unterschiedli-cher Auflösung des Nahbereiches und des Umfeldes des Standortes erstellt.

Auf der Basis des an den Ergebnissen der Standort-untersuchungen geeichten hydraulischen Modellansat-zes wurde ein Stofftransportmodell für die Einzel-kontaminanten erstellt.

In Abhängigkeit von der Mobilität der Einzelschad-stoffe ergaben sich sehr unterschiedliche Konzentra-tionsverteilungen für die derzeitige Situation am Standort und für die zu erwartenden Ausbreitungs-szenarien.

Im Ergebnis der modelltechnischen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass:

- eine Beeinträchtigung örtlicher Grundwassernut-zungsanlagen nicht erfolgt,
- die Schadstoffe über das Grundwasser langfristig zum Vorfluter Weiße Elster transportiert werden.

#### 4 Sanierungsstrategie

Auf der Grundlage

- der Ergebnisse der oben dargestellten Untersu-chungen
- der Tatsache, dass die Kontaminationsherde sich teilweise in unmittelbarer Nähe sensibler, genutz-ter Gebäude und technischer Anlagen befanden,
- von Vorversuchen

wurde die grundsätzliche Sanierungsstrategie - *in-situ Sanierung mit Aushub von Teilbereichen* - entwickelt. Es sollte gezielt mittels in-situ Sanierungstechniken die Untergrundzontamination in den Sanierungsschwerpunkten bis auf ein tolerierbares Maß an Rest-kontaminationen abgereinigt werden.

Für die Sanierung des Standortes wurde eine Kombi-nation aufeinander abgestimmter pneumatischer, hydraulischer und mikrobiologischer in-situ Maßnah-men vorgesehen. Um auch schwerer flüchtige und schlechter wasserlösliche Schadstoffe zu erfassen, wur-den innovative Methoden zur Schadstoffmobilisierung vorgeschlagen, die bisher in der Praxis noch keine brei-te Anwendung gefunden haben.

Somit setzt sich die Sanierungsstrategie am Standort ehemaliges Gas- und Heizwerk Plauen aus folgenden Hauptkomponenten zusammen.

1. Sanierung des Bodens durch Rückbau der wesent-lichen Altanlagen
2. Sanierung des Bodens und des Grundwassers vor Ort (in situ) durch Installation einer Grundwasser-sanierungsanlage
3. Test und Einsatz innovativer Methoden zur Intensi- vierung der klassischen Sanierungstechnologien mit Lösungsansätzen für zahlreiche vergleichbare Standorte
4. Realisierung der Sanierungstätigkeit in Phasen mit ständiger Anpassung an die tatsächlichen Verhält-nisse des Standortes

Mit der fachlichen Stellungnahme der Stadt Plauen vom 22.09.1995 wurde dieser Sanierungsvariante zu-gestimmt.

Unterstützung fand die gewählte Sanierungsstrategie durch ein Förderprogramm der Europäischen Union.

#### 5 LIFE-Förderprojekt

Gefordert wurden im Rahmen des Förderprogramms LIFE 96 der Europäischen Union das Vorhaben „Neuer Lösungs-ansatz und innovative Techno-logien zur in-situ Sanierung eines Heizwerks und ehe-maligen Gaswerlzs“ unter der Referenznummer LIFE96ENV/D/201.



Durch den kombinierten Einsatz bewährter und inno-vativer in-situ Verfahren zur Sanierung der belasteten Böden und des Grundwassers soll eine Verbesserung der Reinigungsleistung der Sanierungsanlage erzielt werden.

Das Basislkonzept des Projektes „Innovative Verfahren“



Abbildung 3:  
Grundwasserkontamination  
interpoliert aus Messwerten  
(Phenol)

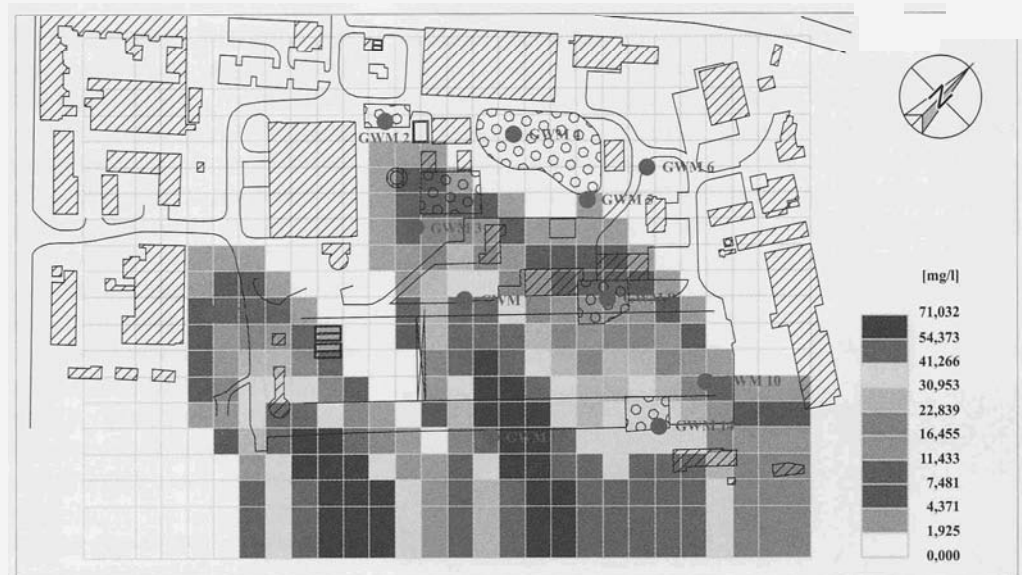


Abbildung 4:  
Berechnete Ammoniumver-  
teilung nach 15 Jahren Pro-  
zesszeit unter Berücksichti-  
gung der Sickerzone, der  
sorbierten Phase und der  
strömenden Phase im GWL

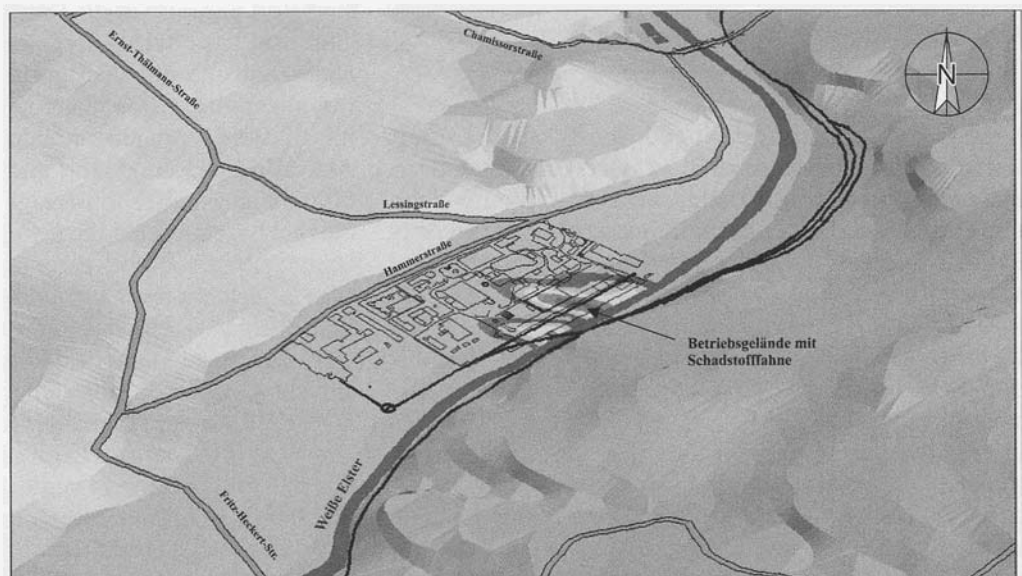


Abbildung 5:  
Perspektivische Ansicht des  
Untersuchungsgebietes mit  
Schadstofffahne

beinhaltete den Test folgender Intensivierungsmaßnahmen:

### 5.1 Kontrollierte Knallgasexplosion

Mit Hilfe von kontrollierten Knallgasexplosionen, sollen Schadstoffe gezielt mobilisiert werden. Direkt im Sanierungsbrunnen wird durch Elektrolyse von Grundwasser Knallgas ( $H_2$  und  $O_2$ ) erzeugt und über einen Zündfunken zur Explosion gebracht. Durch die dabei schlagartig freiwerdende Energie werden zusätzlich weniger flüchtige und adsorptiv gebundene Schadstoffe mobilisiert, die somit durch hydraulische und pneumatische Sanierungsmaßnahmen erfasst werden können. Es wurde erwartet, dass durch den Energieeintrag auch die Verfügbarkeit der Schadstoffe erhöht wird und somit ein beschleunigter Austrag über das Grundwasser bzw. eine mikrobiologische Umsetzung in-situ erfolgen kann.

Dazu werden ausgewählte Sanierungsbrunnen herangezogen. Die Entfernung der mobilisierten Schadstoffe aus dem Grundwasser erfolgte über die zentrale Grundwasserreinigungsanlage.

Leichtflüchtige Schadstoffe wie BTEX-Aromaten und niederkettige KW können durch die Knallgasexplosionen verstärkt in die ungesättigte Bodenzone transferiert werden. Diese wurden mit einer mobilen Anlage aus den Bodenpegeln abgesaugt.

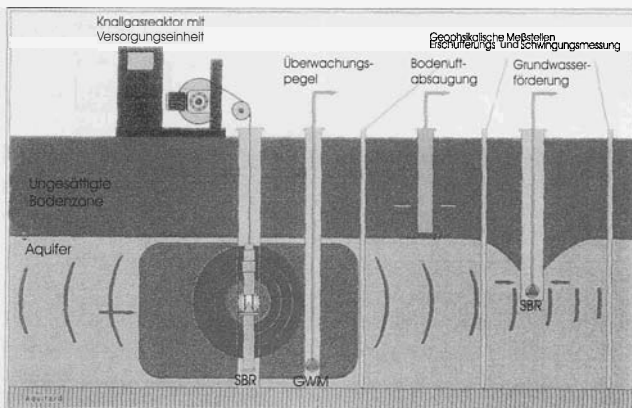


Abbildung 6: Prinzip kontrollierte Knallgasexplosion

Bedingt durch die nur geringe Mächtigkeit des Aquifers und der überstehenden Wassersäule über dem Elektrolysegerät zur Knallgasproduktion entweicht ein großer Teil der bei der Knallgasexplosion freiwerdenden Energie. Gerätetechnisch bedingt kamen elastische Packer, welche aus einer 5 mm starken Gummipolsterung bestehen, zum Einsatz. Jene schützen die Elektrolysezelle vor einer Zerstörung und dichten den Reaktionsraum gegenüber der übrigen Wassersäule im Brunnen ab.

Die Reichweite des Erschütterungsimpulses bei maximaler Elektrolysedauer von 180 s beläuft sich unter den geohydraulischen Standortgegebenheiten auf einen Radius von ca. 15 m um die Anregungsbohrung. Bei mächtigeren Grundwasserleitern mit einer

größeren Überdeckung ist von einer höheren Wirksamkeit auszugehen.

Abzüglich der hohen Energieverluste im Anregungsbrunnen war von einer weitestgehend horizontalen Ausbreitung des Energieimpulses, welcher sich in Millisekunden ausbreitet, auszugehen. Die dem Aquifer überlagernden Deckschichten haben stark dämpfende Eigenschaften. Schadstoffmobilisierungen vorrangig leichtflüchtiger BTEX-Aromaten konnten hier nur untergeordnet in Abhängigkeit des Schadstoffinventars im Testfeld gemessen werden.

Der Einsatz des Gerätes, welches primär zur Brunnenregenerierung entwickelt worden ist, beschränkte sich auf Brunnen mit einem Durchmesser von DN 150 – DN 500. Kunststoff- oder Steinzeugbrunnen können durch den Einsatz des Gerätes bei zu hohen Ladungen leiden bzw. zerstört werden. In diesem Falle besteht die Möglichkeit, die Anzahl der Impulse zu erhöhen und somit die Elektrolysezeit, das bedeutet die Impulsstärke zu verringern.

Als nachteilig ergab sich die geringe Frequenz der Anregungen. Nach einer Elektrolysezeit von  $t_{\max} = 180$  s regelt eine SPS die für das Gerät erforderliche Abkühlzeit in der Größenordnung der Anregungsdauer bevor der Vorgang erneut startete.

Als positiv erwies sich, dass nachweislich mobile (BTEX) und weniger mobile (Phenole, PAK) Schadstoffe aus der ungesättigten Zone in den Aquifer hinein mobilisiert werden konnten, was zu einer Beschleunigung der laufenden hydraulischen Sanierung führt. Die in diesem Zusammenhang stehenden Einsparungen infolge der Verringerung der Sanierungsdauer standen jedoch im Falle des konkreten Sanierungsvorhabens nicht im Verhältnis zu den Aufwendungen des Knallgasverfahrens.

### 5.2 TUBA – thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung

Über Injektionslanzen wird ein Dampfgemisch in den Untergrund eingebracht, wobei die Schadstoffe mobilisiert und teilweise in die Gasphase transferiert werden. Die Gasphase wird über zwei Extraktionsbrunnen abgesaugt und die Flüssigphase über integrierte Systeme abgepumpt. Das abgesaugte Schadstoff-/Dampfgemisch wird zunächst kondensiert, die Abluft über Aktivkohle gereinigt und anschließend in die Atmosphäre abgegeben. Die flüssige Phase wird zuerst über einen Phasenabscheider geleitet, anschließend durch Aktivkohleabsorption gereinigt und dann in die Vorflut eingeleitet. Aus der wässrigen und gasförmigen Phase separierte Schadstoffe werden in einem Sammelbehälter aufgefangen und können entsorgt werden.

Um den Sanierungsfortschritt und die Effizienz des TUBA-Verfahrens zu überprüfen, wurde die Bodenluft zunächst herkömmlich ohne Dampf-Injektion abgesaugt. Anschließend erfolgte die Bodenluftabsaugung mit Dampf-Injektion. Mit Hilfe von Bodenluftanalysen wurde der Schadstoffaustrag bilanziert. Aus dem Vergleich der Absaugung mit und ohne Eintrag von Wär-

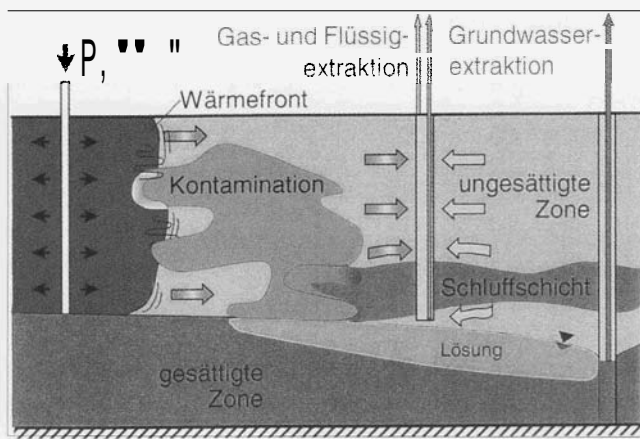


Abbildung 7: Prinzip thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung

meenergie war die Wirksamkeit des TUBA-Verfahrens messbar.

Die technische Machbarkeit, mögliche Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung durch Dampfinjektion wurde durch den pilothaften Einsatz am Standort „ehemalige Benzolübergabe“ demonstriert. Der bereits unmittelbar nach Beginn der Dampfinjektion rapide angestiegene Schadstoffaustrag untermauert dies eindrucksvoll. Durch lückenhafte Kenntnisse insbesondere über die Durchlässigkeit des Kiesaquifers (zonte das an sich sehr effiziente Verfahren am Standort jedoch noch nicht optimal eingesetzt werden. Die individuelle Planung einer Sanierungsanlage für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung und der effektive Anlagenbetrieb mit höchst möglicher Reinigungsleistung setzt also eine genaue Kenntnis der standortspezifischen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse sowie der räumlichen Schadstoffverteilung im Boden voraus. Darüber hinaus ist zur erfolgreichen Verfahrensanwendung eine umfassende Kenntnis der komplexen, während des Betriebes auftretenden, physika-

lischen Prozesse und die schnelle Anpassung des Versuchsbetriebes an diese Prozesse unerlässlich.

### 5.3 Reinfiltration erwärmten gereinigten Grundwassers

Das Verfahrenstechnische Konzept der Wasserreinigungsanlage wurde von vorn herein so konzipiert, dass der zur Wiederversickerung vorgesehene Volumenstrom über einen Wärmetauscher auf bis zu 45 °C aufgeheizt werden konnte. Die Bereitstellung der Wärmeenergie war relativ unproblematisch, da durch die Wärmeversorgung Plauen GmbH am Standort das zentrale Heizwerk der Stadt Plauen betrieben wird.

Die Reinfiltration von gereinigtem und erwärmtem Grundwasser über Rigolen führte zu den folgenden positiven Effekten im Betrieb der Sanierungsanlage:

1. Die Durchsatzmenge der Grundwasserreinigungsanlage konnte durch die Rückführung des Förder volumensstromes deutlich erhöht werden, da der vorhandene Grundwasserleiter nur ein begrenztes Wasserdargebot zu Verfügung stellte.
2. Die Mobilisierbarkeit der in den Deckschichten gebundenen Schadstoffe konnte durch die zusätzliche Durchströmung mit erwärmtem Wasser deutlich erhöht werden.
3. Durch die deutliche Anhebung der Bodentemperatur in den Sanierungsbereichen auf gegenwärtig über 20 °C auch im Winterbetrieb, verbesserten sich die Lebensbedingungen der vorhandenen Bodenbiologie.
4. Zusätzlich zur Mobilisierung löslicher Kontaminanten konnten bisher ca. 2,5 Tonnen dispers verteilter Teere über speziell ausgerüstete Sanierungsbrunnen (SBR) der Bodenmatrix entzogen werden.

### 5.4 Einsatz von BIOCRACK®

Ziel des Versuches war der Nachweis einer sanierungsbeschleunigenden Wirkung von Biocrack® durch:

- Erhöhung der biologischen Aktivität im Bereich der Schadensherde infolge der Verbesserung der

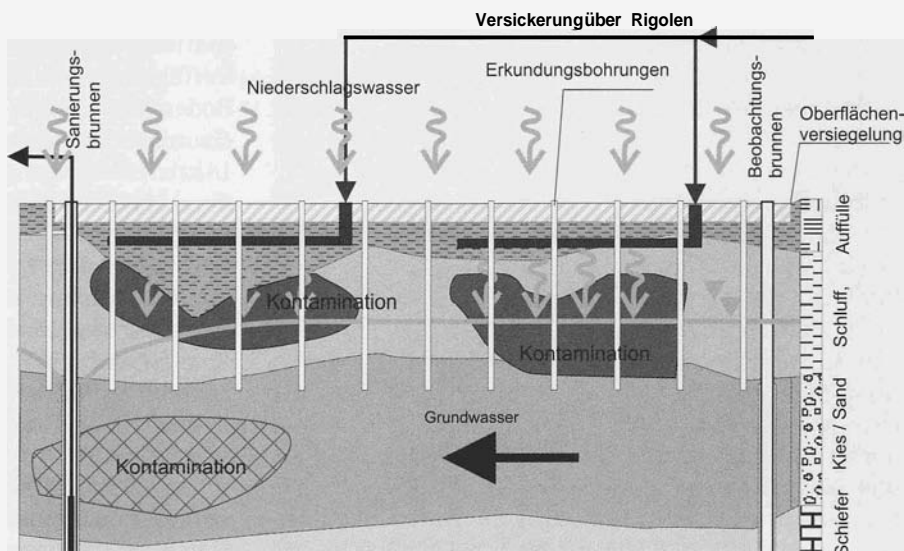


Abbildung 8: Prinzip Reinfiltration erwärmten und gereinigten Grundwassers

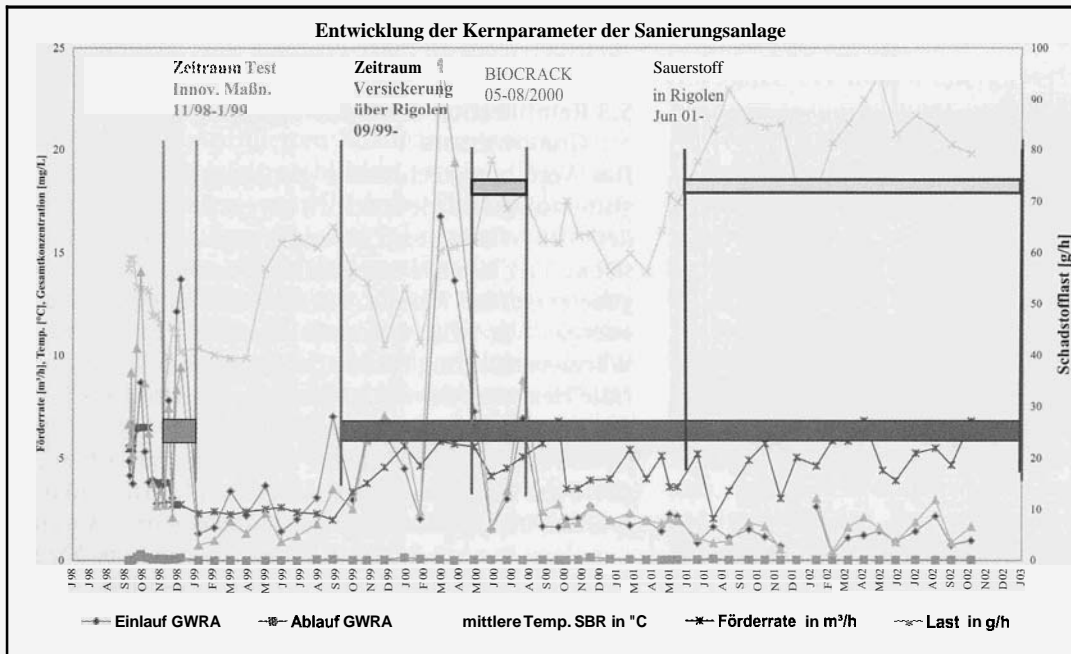


Abbildung 9: Entwicklung der Kernparameter der Sanierungsanlage

Lebensbedingungen der vorhandenen Mikroorganismen.

- Verbesserung der Mobilität der in der Bodenmatrix gespeicherten Schadstoffe durch die im Biocrack(r) enthaltenen Tenside.

Das ökologische Zertifikat für BIOCRACK® [2] belegt die folgende Zusammensetzung:

- amphiphiles phosphorhaltiges Tensid, hergestellt auf Basis pflanzlicher Rohstoffe 10 - 30 %
- Stickstoff in organischer Bindung 15 - 30 %
- nichtionisches Tensid, hergestellt auf Basis pflanzlicher Rohstoffe unter 5 %
- pH Wert des Mischproductes 6,5 + 0,2

Die Inhaltstoffe wurden wie folgt bewertet:

1. Es ist ein phosphorhaltiges amphiphiles Tensid enthalten. Diese Verbindung wird leicht und schnell zu Kohlendioxid und Wasser abgebaut und damit der Nährstoff Phosphat freigesetzt.
2. Es ist ferner ein nichtionogenes Tensid enthalten, das ebenfalls leicht zu CO<sub>2</sub> und Wasser abgebaut wird.
3. Des weiteren ist eine einfache stickstoffhaltige Verbindung enthalten, die im Abwasser schnell und vollständig zu ihren Grundbausteinen Kohlendioxid und Ammoniak gespalten wird.

Während der Biocrack®-Kampagne kam es innerhalb der technischen Systeme der Versickerungsrigolen zu explosionsartiger Vermehrung von Mikroorganismen. Makroskopisch zeigte sich dies durch Bildung eines weißen Belages (Biorasen) auf den Oberflächen der Brunnenringe und der Anlagenteile im Bereich der Versickerungsrigolen. Folge dieser Erscheinung war eine drastische Reduzierung der Aufnahmefähigkeit der mit Biocrack® beaufschlagten Rigolen bis hin

zum vollständigen Verschluss. Dies führte zur Unterbrechung des Versuches und zur zeitweisen Außerbetriebnahme der beaufschlagten Rigolen.

Nach dem Trockenfallen der Rigolen bildete sich der Biorasen zurück und die Rigolen erreichten ca. 2 - 3 Wochen später wieder ihre ursprüngliche Aufnahmefähigkeit.

Im Gegensatz zu einer vermuteten positiven Wirkung der im Biocrack<sup>a</sup> enthaltenen Tenside auf die Mobilisierbarkeit der im Boden gespeicherten Schadstoffe kam es zu einer drastischen Reduzierung der Kreislaufwassermenge und zu einem erheblichen Rückgang der Sanierungsleistung der Anlage am Standort. Die Wirksamkeit der einzelnen innovativen Intensivierungsmaßnahmen kann anhand der nachfolgenden Grafik beschrieben werden.

Als limitierender Faktor für die Wirksamkeit der in den Sanierungsbereichen vorhandenen Bodenbiologie wurde im Ergebnis dieses Versuches jedoch die Verfügbarkeit von Sauerstoff in der ungesättigten Bodenzone und im Grundwasser erkannt. Aus diesem Grunde wurde das LIFE-Projekt um das Konzept zur „Aktivierung von gesteuerten Austauschprozessen in der Aerationzone“ erweitert.

### 5.5 Aktivierung von gesteuerten Austauschprozessen in der Aerationzone

Grundlage der Überlegungen zu einer Erweiterung des Konzeptes der innovativen Maßnahmen am Standort ehemaliges Gaswerk Plauen ist die Suche nach Möglichkeiten zur gezielten Beeinflussung der in den Deckschichten des Grundwasserleiters gebundenen organischen Schadstoffe durch Nutzung biologischer Prozesse in der Bodenmatrix und im Grundwasser.

Untersucht wurden im wesentlichen technische Maß-

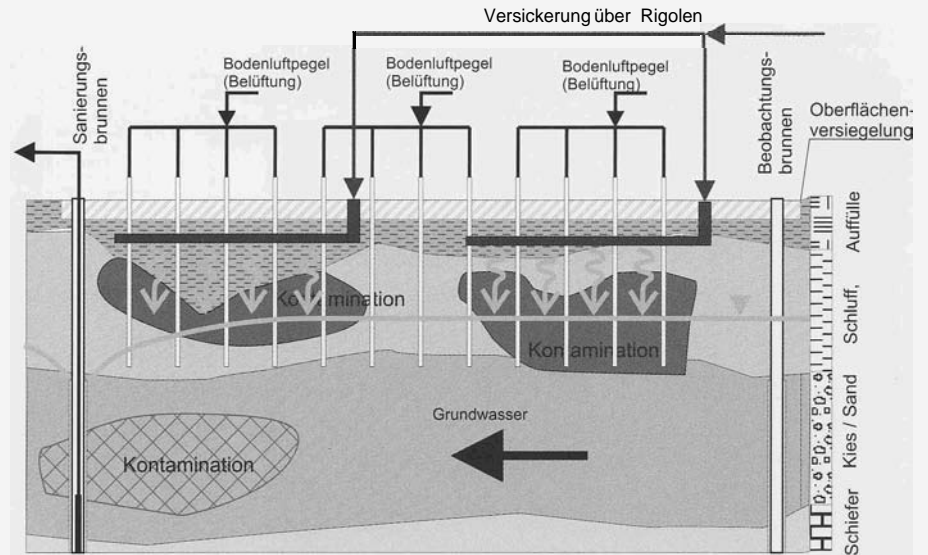


Abbildung 10:  
Prinzip Belüftung der Aerationzone

nahmen und Möglichkeiten zur gezielten Verbesserung der Bedingungen für den biologischen Abbau der im Boden vorhandenen organischen Kontaminanten durch Oxidation mit molekularem Sauerstoff unter dem Einfluss von Bakterien.

Unter dem Begriff Abbau soll an dieser Stelle sowohl die vollständige Mineralisierung als auch die Umwandlung komplexer organischer Verbindungen zu einfacheren und damit mobilisierbaren organischen Verbindungen verstanden werden.

Voraussetzungen und theoretischer Hintergrund für die Konzepterweiterung waren:

- Schaffung ausreichenden Sauerstoffangebotes
- Durchlüftbarkeit des Kontaminationsraumes
- Sicherung der Lebensfähigkeit von Mikroorganismen
- Oxidierbarkeit der Schadstoffe
- Modellierbarkeit der Vorgänge
- Messbarkeit der Vorgänge

Die vorgelegten Untersuchungsergebnisse [3] zur Aktivierung von Austauschprozessen in der Aerationzone des ehemaligen Gaswerkes Plauen basieren auf vier Säulen.

- Auswertung der bisherigen Sanierungsergebnisse im Rahmen von Grundwasserreinigung und Versickerung
- Auswertung veröffentlichter Forschungsergebnisse zu Transporteigenschaften und zum Abbau organischer Schadstoffe mit dem Ziel der Verwertung in einem Stofftransportmodell
- Erstellung eines numerischen Stofftransportmodells unter Einbeziehung von durch Luftsauerstoff generierten Verstoffwechslungsprozessen
- Durchführung und Auswertung eines In-situ-Experimentes zum Schadstoffabbau durch Belüftung der Aerationzone im Sanierungsbereich „ehemaliger Scheibengasbehälter“

Auf Basis der Literaturlauswertung konnten ausreichend gesicherte Grundlagen zur Absicherung der theoretischen Basis des Modells geschaffen werden.

Das hier vorgelegte Modell betrachtet die Schadstoffentwicklung in der Aerationzone, die durch eine Auffüllung im oberen Bereich und durch den Auenlehm im unteren Bereich charakterisiert ist. Der Bereich der Auenlehme ist Eintragsbereich für Luftsauerstoff.

Die Versuchsdurchführung im Sanierungsbereich wurde durch das Einpressen von atmosphärischer Luft mittels Seitenlantalverdichter in 10 vorhandene Bodenluftpegel realisiert. Es wurden 100 – 150 m<sup>3</sup> (im Mittel 140 m<sup>3</sup>) Luft pro Stunde eingebracht. Das Einblasen von Luft erfolgte rhythmisch in Zyklen von jeweils 8 Stunden pro Tag.

Das Verhalten der Schadstoffe wird im Modell im Rahmen des Sickerwassertransportes unter Einfluss der Lösungs-, Verdünnungs- und Sorptionsvorgänge und durch Sauerstoff generierte Verstoffwechslungsprozesse nachgebildet.

Um die Wirkung relevanter Prozesse aufzuzeigen, wurden die folgenden Modellvarianten untersucht:

- Ausbreitung als Tracer.



Abbildung 11: Versuchsanlage zur Bodenbelüftung

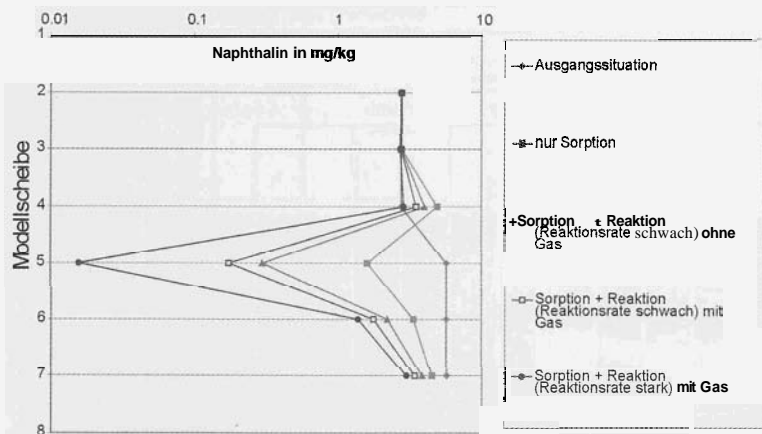


Abbildung 12: Naphthalin-Entwicklung (solid)

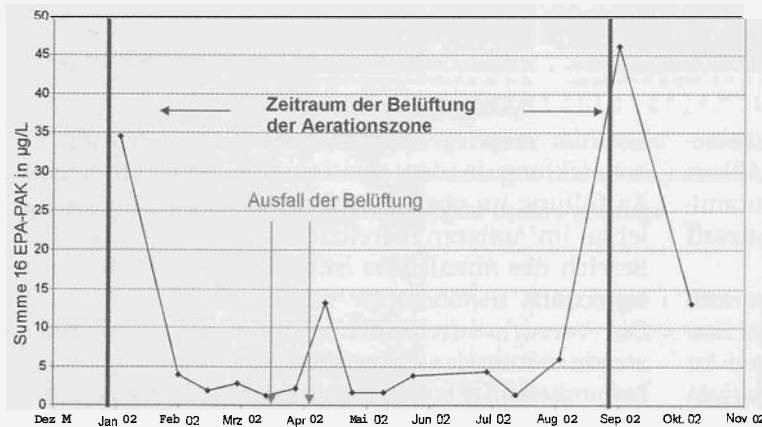


Abbildung 13: Entwicklung der PAK-Konzentrationen (Summe 16 EPA-PAK in µg/L) am Sanierungsbrunnen 1 im Zeitraum der Belüftungsversuche

- Ausbreitung mit Sorption ohne Reaktionen.
- Ausbreitung mit Sorption und Reaktionen ohne  $O_2$ -Zuführung.
- Ausbreitung mit Sorption und Reaktionen mit  $O_2$ -Zuführung (schwache Reaktionsrate).
- Ausbreitung mit Sorption und Reaktionen mit  $O_2$ -Zuführung (starke Reaktionsrate).

Modelltechnisch wurde die Bodenbelüftung jeweils in der 5. Modellscheibe realisiert.

Die Auswertung der Modellrechnungen zeigt, dass Sauerstoff generierte Verstoffwechslungen der MIW, der Phenole, der BIEX und der Zwei- und Dreiring-PAK richtig widerspiegelt werden. Das Modell zeigt ferner, dass vier- und mehrringige PAK zumindest im betrachteten Zeitraum nicht verstoffwechselt werden. Durch Sickerwassertransport generierter Schadstoffaustrag ist für Benzol, Ethylbenzol, Toluol, Xylol, Naphthalin und Phenole in dieser Reihung in abnehmender Intensität noch möglich.

Das Modell zeigt weiterhin, dass die MIW und die drei- und höherringigen PAK durch lediglichen Sickerwassertransport keinen signifikanten Austrag aus der Aerationzone im betrachteten Zeitraum erfahren.

Die modelltechnisch beschriebenen Effekte konnten mittelbar auch im Rahmen der Versuchsdurchführung beobachtet werden.

Die intensive Belüftung der Aerationzone hat ganz

offensichtlich Vorgänge angeregt, die die Verstoffwechslung zum Beispiel der PAK intensiviert hat. Somit standen nur geringere Konzentrationen für den Übergang in das Grundwasser zur Verfügung. Die Ergebnisse der Untersuchungen machen somit deutlich, dass ausgehend vom gegenwärtig erreichten Stand der Sanierung durch Grundwasserreinigung und Versickerung für die relevanten Schadstoffe eine Absenkung der Konzentrationen in der Aerationzone in überschaubaren Zeiträumen (das Modell hat drei Jahre betrachtet) ohne Aktivierung von durch Sauerstoff generierte Verstoffwechslungsprozesse schlecht möglich ist.

Die Ergebnisse des im Sanierungsbereich des ehemaligen Scheibengasbehälters durchgeführten Experimentes zur Aktivierung von Abbauprozessen in der Aerationzone befinden sich in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellrechnungen. Die BIEX und Phenole im Grundwasser werden während der Belüftung nahezu vollständig verstoffwechselt.

Eindrucksvoll ist das Verhalten der PAK. Aus den Untersuchungen der Speziesverteilung vor und während der Belüftung und nach Einstellung wird geschlussfolgert, dass im Rahmen der Belüftung der Aerationzone die 2- und 3-Ring-PAK verstoffwechselt werden. Die 2-Ring-PAK werden offensichtlich schneller verstoffwechselt als die 3-Ring-PAK. Die langsame-

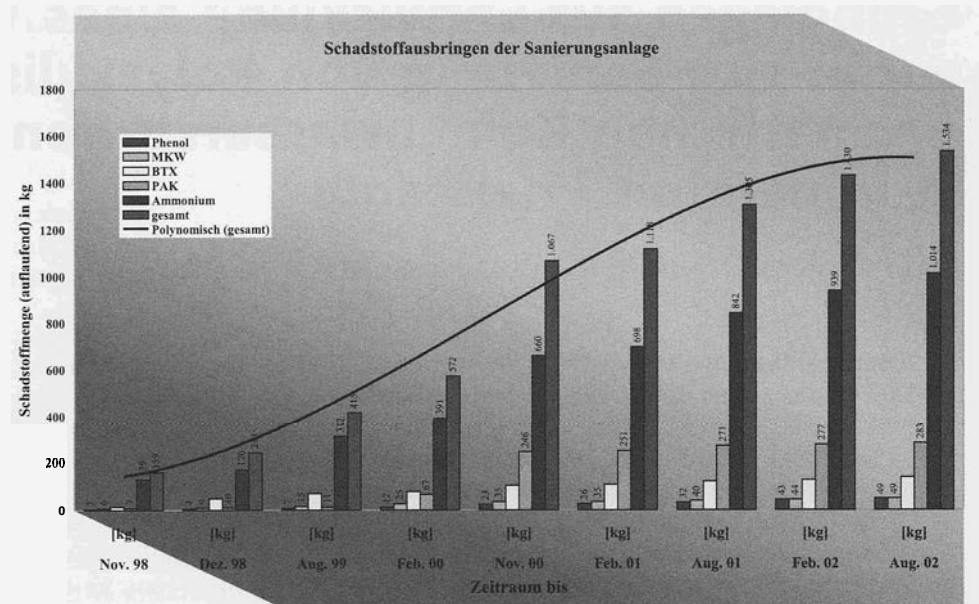


Abbildung 14:  
Gesamtschadstoffausbringen  
über den Wasserpfad

re Verstoffwechslung der 3-Ring-PAK ist Ursache dafür, dass sie nach Beendigung der Belüftung gelöst ausgetragen werden können und so zu einem erneuten Anstieg der Konzentrationen im Grundwasser führen. Eine Verstoffwechslung der 4-, 5- und 6-Ring-PAK konnte im Rahmen der halbjährigen Versuche nicht belegt werden.

Im Kontext zu den Sanierungsanforderungen kann davon ausgegangen werden, dass diese höherkettigen Verbindungen nach Beendigung der Sanierungsdurchführung immobilisiert in der Bodenmatrix verbleiben können und zu keiner relevanten Belastung des Grundwassers führen werden.

Es kann grundsätzlich eingeschätzt werden, dass die Ergebnisse der oben dargestellten Untersuchungen eine Empfehlung zur Anwendung des Konzeptes der „Gesteuerten Austauschprozesse in der Aerationzone“ am Standort Plauen und an Vergleichsstandorten rechtfertigt.

## 6 Stand der Sanierungsdurchführung

Die Sanierungsdurchführung am Standort Plauen befindet sich im 5. Betriebsjahr. Insgesamt konnten im Verlauf der Sanierungsdurchführung ca. 1,5 Tonnen gelöste Schadstoffe mit der Wasserreinigungsanlage aus dem geförderten Grundwasserstrom entfernt werden. Zusätzlich wurden ca. 2,5 Tonnen flüssiger Teere aus den Sanierungsbrunnen gewonnen.

Die Entwicklung des Schadstoffausbringens wird durch die nachfolgende Abbildung verdeutlicht.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt laufen die konzeptionellen Arbeiten zur Entwicklung eines Abfahr- und Nachsorgekonzeptes für die Sanierungsanlage.

## Literatur

- [1] ARGE NUCEM Dresden / Züblin Umwelttechnik Sanierungsuntersuchung für das Objekt Heizwerk und ehemaliges Gaswerlz Plauen, Chemnitz, November 1994
- [2] Ökologisches Zertifikat für BIOCRACK, Stand: Mai 1992, Henkel KGaA, Fachabteilung Ölzologie, Dr. Josef Steber und Dr. Peter Gode
- [3] HPC HARRESS PICKEL CONSULT AG Konzepterweiterung Innovative Maßnahmen Sanierung ehemaliges Gaswerlz Plauen; Aktivierung von gesteuerten Austauschprozessen in der Aerationzone; Sanierungsbereich ehemaliger Scheibengasbehälter; Gera, Oktober 2002

## Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Rolf Thamm  
envia Mitteldeutsche Energie AG  
Beauftragtenwesen  
Friedrich-Ebert-Str. 26, 04416 Markkleeberg  
Tel.: +49-341/120 79 70, Fax: +49-341/120 72 89  
E-Mail: rolf.thamm@enviam.de  
<http://www.enviam.de>

Dipl.-Ing. Klaus Meinhardt  
envia Mitteldeutsche Energie AG  
Erzeugung/Wärme/Technik/Instandhaltung  
Annahofener Graben 1-3, 03099 Kolkwitz OT Kleingaglow  
Tel.: +49-355/68 18 20, Fax: +49-355/6 814 23  
E-Mail: ldaus.meinhardt@enviam.de  
<http://www.enviam.de>

Dr.-Ing. Michael Eckart  
HPC HARRESS PICKEL CONSULT AG, Niederlassung Gera  
Otto-Dix-Str. 9, 07548 Gera  
Tel.: +49-365/564 22, Fax: +49-365/564 24  
E-Mail: meckart@hpc-ag.de  
<http://www.hpc-ag.de>

Dipl.-Ing. Rolf Zurl  
HPC HARRESS PICKEL CONSULT AG, Niederlassung Gera  
Otto-Dix-Str. 9, 07548 Gera  
Tel.: +49-365/564 22, Fax: +49-365/564 24  
E-Mail: rzurl@hpc-ag.de  
<http://www.hpc-ag.de>

Prof. Dr. Bernd Voland  
HPC HARRESS PICKEL CONSULT AG, Niederlassung Gera  
Otto-Dix-Str. 9, 07548 Gera  
Tel.: +49-365/564 25, Fax: +49-365/564 24  
E-Mail: bvoland@hpc-ag.de  
<http://www.hpc-ag.de>