

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

**Pilotversuch zur energiesparenden, ökonomischen Reinigung
kontaminierten Grundwassers im innerstädtischen Bereich mit einem
Dichtwand-Heber-Reaktor am „Öl-Epple“-Areal in Stuttgart**

B. Barczewski, B. Memminger
Universität Stuttgart
Institut für Wasserbau

Förderkennzeichen BWD 20005

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Mai 2004

ZUSAMMENFASSUNG

Von der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS (Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart) und dem Grundwasserforschungsinstitut Luckner & Partner (Dresden) wurde ein Verfahren zur Grundwassersanierung mittels Dichtwand-Heber-Reaktor (DHR) entwickelt. Dieses nutzt ein vorhandenes ausreichendes Grundwassergefälle oder die durch eine Dichtwand erzeugte Potentialdifferenz zur Förderung von Grundwasser nach dem bekannten Heberprinzip. Das kontaminierte Grundwasser wird je nach Art und Menge der Schadstoffe in verschiedenen Reaktoren, die in das Hebersystem integriert sind, gereinigt. Zu Beginn des Projektes wurde in VEGAS eine DHR-Versuchsanlage im technischen Maßstab gebaut und in Betrieb genommen, in die als Hauptbestandteile ein Unterdruck-Ölabscheider, ein Unterdruck-Aktivkohlefilter, eine automatische Entlüftung sowie eine automatische Meßdatenerfassung integriert sind. Wie die Versuche gezeigt haben, ist auch im Unterdruck ein stabiler Anlagenbetrieb bei hoher Reinigungsleistung gewährleistet. Ein erster Anwendungsfall befindet sich im Kraichgau. Dort ist das DHR-Verfahren seit Juli 2001 zur Sanierung eines CKW-Schadens erfolgreich in Betrieb. Weitere Anwendungsfälle sind in Planung. Die Realisierung des Verfahrens am Gesamtstandort „Öl-Epple“ in Stuttgart kann aufgrund finanzieller Engpässe der Stadt Stuttgart nicht erfolgen. Deshalb ist geplant, einen Teilbereich am Standort Fumy zu sanieren, der sich im Abstrom des „Öl-Epple“-Areal befindet (Sekundärschaden).

SUMMARY

The Research Facility for Subsurface Remediation VEGAS (Institute of Hydraulic Engineering, University of Stuttgart) and the Institute for Groundwater Research Luckner & Partner (Dresden) have developed a method for treating contaminated groundwater with a siphon-reactor system (German abbrev. DHR). This system uses an existing hydraulic gradient or a local gradient produced by an impermeable wall in order to drain groundwater by the siphon principle. Depending on the type and amount of contaminants, the water is cleaned in one or several reactors which are connected to the siphon conduit. At the beginning of the project, a DHR test plant on a technical scale was built and operated at VEGAS. The main elements of this plant are a low-pressure oil separator, a low-pressure activated carbon filter, an automatic deaeration installation, and an automatic measurement-data registration. As the tests with this plant have shown, a stable operation of the system together with a high purification efficiency are also guaranteed at low pressure. Since July 2001, this new technology has already been successfully applied on a site in Baden-Württemberg in order to remediate groundwater contaminated with chlorinated hydrocarbons. Further applications of the siphon-reactor system are currently being planned. The application on the complete site "Öl-Epple" at Stuttgart can not be realized due to financial limitations of the city of Stuttgart. Therefore it is being planned to remediate just one part on the site "Fumy" which is situated downstream of the site "Öl-Epple" (secondary contamination).

INHALTSVERZEICHNIS

TABELLENVERZEICHNIS.....	3
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	3
ABKÜRZUNGEN.....	5
FORMELZEICHEN UND INDIZES	7
1 EINLEITUNG.....	9
2 DAS DICHTWAND-HEBER-REAKTOR-VERFAHREN (DHR).....	12
2.1 Verfahrensbeschreibung.....	12
2.2 Vorteile.....	16
2.3 Pump and Treat-Verfahren versus DHR-Verfahren.....	17
2.4 Funnel and Gate-Systeme versus DHR-Verfahren.....	20
2.5 DHR-Versuchsanlage bei VEGAS.....	23
2.5.1 Automatische Entlüftung.....	26
2.5.2 Beispiele der automatischen Meßdatenerfassung.....	28
2.6 Eliminierung von Schadstoffen.....	30
2.6.1 Sonderfall: Vinylchlorid.....	31
2.6.2 Sonderfall: Chrom(VI).....	36
2.7 Planung von DHR-Anlagen.....	38
2.7.1 Entscheidungshilfe: (D)HR oder P+T?.....	38
2.7.2 Prinzipieller Aufbau einer (D)HR-Anlage.....	39
2.7.3 Rohrleitungsdimensionierung.....	41
2.7.4 Dimensionierung von Aktivkohlefiltern.....	46
3 DER STANDORT „ÖL-EPPLE“-AREAL.....	50
3.1 Situation.....	50
3.2 Topographie, Geologie, Hydrogeologie und Schadstoffsituation.....	51
3.3 Anwendungsplanung des DHR-Verfahrens für das „Öl-Epple“-Areal.....	57
4 ANWENDUNGSFALL CKW-KONTAMINATION IM KRAICHGAU.....	64
5 AKTUELLE ANWENDUNGSPLANUNGEN.....	68
5.1 Firma Fumy, Stuttgart.....	68
5.2 Ehemaliges Okal-Areal, Titisee-Neustadt.....	71
5.3 CKW-Schaden in Heitersheim.....	73
6 GEOSIPHON™ GROUND WATER REMEDIATION SYSTEM – PILOTSTUDIE IN DEN USA.....	74
7 FAZIT.....	78
8 LITERATUR.....	80

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Gängige Verfahren zur Grundwasserreinigung (verändert nach LfU 1995)	30
Tabelle 2:	Rohrreibungsverluste für verschiedene Durchflüsse und Durchmesser (eigene Berechnungen).....	44
Tabelle 3:	Hydrogeologische Daten Epple-Areal	52
Tabelle 4:	Varianten der Grundwassersanierung für die Standorte Öl-Epple und Fumy	61
Tabelle 5:	Verfahrensvergleich Pump and Treat und passiver Heber-Reaktor	66
Tabelle 6:	Empfehlungen für den Bau von Heber-Reaktor-Anlagen nach PHIFER ET AL. 2002	77

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Übersicht über gängige Sanierungsverfahren (SCHRENK 2003)	9	
Abbildung 2:	Heber-Reaktor-Verfahren (HR)	13	
Abbildung 3:	Dichtwand-Heber-Reaktor-Verfahren (DHR) – Seitenansicht.....	15	
Abbildung 4:	Dichtwand-Heber-Reaktor-Verfahren (DHR) – Draufsicht	15	
Abbildung 5:	Prinzipskizze Grundwasserentnahme zur Fassung einer Schadstofffahne (gelöst) im Grundwasser (LFU 1995)	18	
Abbildung 6:	Prinzipskizze von Funnel & Gate-Systemen (STARR & CHERRY 1994)	21	
Abbildung 7:	Fließbild der DHR-Versuchsanlage.....	24	
Abb. 8:	DHR-Versuchsanlage (EG)	Abb. 9: DHR-Versuchsanlage (UG).....	24
Abbildung 10:	Prinzipskizze des Ölabscheiders	25	
Abbildung 11:	Automatische Entlüftung – Wasserbehälter am Hochpunkt der Anlage mit Verbindung zur Vakuumpumpe)	26	
Abbildung 12:	Automatische Entlüftung – Niveausteuern und Vakuumpumpe	27	
Abbildung 13:	Schaltplan der automatischen Entlüftung.....	27	
Abbildung 14:	Automatische Meßdatenerfassung (Beispiel 1)	29	
Abbildung 15:	Automatische Meßdatenerfassung (Beispiel 2)	29	
Abbildung 16:	VC-Abbau unter Einfluß von Sauerstoff und Phosphat, Batchversuch (MAYER 2002) [Anmerkung: Flächeneinheiten = Konzentrationsäquivalente]	33	
Abbildung 17:	Vergleich der Adsorption von VC auf verschiedenen Aktivkohlen (MAYER 2002).....	35	
Abbildung 18:	Entscheidungshilfe: P+T oder (D)HR	38	

Abbildung 19: Prinzipieller Aufbau einer (D)HR-Anlage.....	40
Abbildung 20: Lageplan Epple- und Fumy-Areal (Ausschnitt aus Topographischer Karte, Maßstab 1:25.000)	50
Abbildung 21: Höhenprofil Epple-Areal / Neckar.....	51
Abbildung 22: Längsschnitt durch das Untersuchungsgebiet (nach WOLFF 1999)	53
Abbildung 23: Rückbau der Gebäude auf dem Epple-Areal (Januar 2001).....	54
Abbildung 24: Rückbau der Gebäude und Abfallentsorgung auf dem Epple-Areal (Januar 2001).....	54
Abbildung 25: Bodensanierung auf dem Epple-Areal (April 2002) (AFU 2002)	55
Abbildung 26: Ausmaß der Bodenkontamination auf dem Epple-Areal (Mai/Juni 2002) (AFU 2002)	55
Abbildung 27: Bodensanierung auf dem Epple-Areal (Juli 2002)	56
Abbildung 28: Bodensanierung und Wiederauffüllung auf dem Epple-Areal (September 2002)	56
Abbildung 29: Geplante Drainage und Reaktorgebäude am Epple-Areal.....	58
Abbildung 30: DHR-Anlagenschema (Epple-Areal)	59
Abbildung 31: Standort Glockenstraße 10 im Abstrom des Epple-Areals (September 2002)	62
Abbildung 32: Strippanlage (außer Betrieb, Juli 2001)	64
Abbildung 33: Aktivkohlefilter – Entlüftung – Einleitung in Vorfluter.....	65
Abbildung 34: Der Standort Fumy (Stuttgart, Glockenstraße 56)	68
Abbildung 35: Baureifmachung und Neubau auf dem Okal-Areal (Frühjahr 2003).....	71
Abbildung 36: Lageplan Okal-Areal in Titisee-Neustadt (Ausschnitt aus Topographischer Karte, Maßstab 1 : 25.000)	72
Abbildung 37: Pre-Siphon Treatment Cell GeoSiphon Configuration (PHIFER ET AL. 2002).....	74
Abbildung 38: Post-Siphon Treatment Cell GeoSiphon Configuration (PHIFER ET AL. 2002).....	75

ABKÜRZUNGEN

A	Künstliche Auffüllung
AfU	Amt für Umweltschutz (Stadt Stuttgart)
B	Behälter
BH	Bochinger Horizont
BTEX	Aromatische Kohlenwasserstoffe (Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole)
BWPLUS	Baden-Württemberg Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
Cr(III)	Chrom der Oxidationsstufe +III
Cr(VI)	Chrom der Oxidationsstufe +VI
DCE	Dichlorethen (= Dichlorethylen)
DHR	Dichtwand-Heber-Reaktor-Verfahren
DN	Normdurchmesser (in mm)
DRM	Dunkelrote Mergel
E	Osten
EPDM	Ethylen-Propylen-Kautschuk als Terpolymer
F	Filter
F+G	Funnel and Gate-Verfahren
GG	Grundgipsschichten
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
HDPE	Polyethylen hoher Dichte (High Density Polyethylene)
HR	Heber-Reaktor-Verfahren
km 1	Gipskeuper
ku	Lettenkeuper
LCKW	Leichtflüchtige Chlorierte Kohlenwasserstoffe
LfU	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
LHKW	Leichtflüchtige Halogenierte Kohlenwasserstoffe
MKW	Mineralöl-Kohlenwasserstoffe
mo	Oberer Muschelkalk
N	Norden
NN	Normal Null
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PCE	Per-/Tetrachlorethen (= Per-/Tetrachlorethylen = Per)

PCB	Polychlorierte Biphenyle
PN	Probenahme
P+T	Pump and Treat-Verfahren
Q	Quartär
S	Süden
SDR	Verhältnis von Außendurchmesser zu Wanddicke, z. B. bei HDPE-Rohrleitungen
SHKW	Schwerflüchtige Halogenierte Kohlenwasserstoffe
TCE	Trichlorethen (= Trichlorethylen = Tri)
VC	Vinylchlorid
VEGAS	Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung
W	Westen

FORMELZEICHEN UND INDIZES

Formelzeichen

A	Fläche [m ²]
b	Aquifermächtigkeit [m]
c	Konzentration [kg/m ³]
C	Konstante [-]
d_i	Innendurchmesser [m]
Δh	Theoretische Potentialdifferenz zwischen Entnahme- und Einleitstelle [m]
$\Delta h'$	Real vorhandene Potentialdifferenz zwischen Entnahme- u. Einleitstelle [m]
ΔH	Geodätischer Höhenverlust [m]
Δh_E	Einbauverluste [m]
Δh_F	Verluste im Aktivkohlefilter [m]
Δh_R	Rohrreibungsverlust [m]
Δp_E	Einbauverluste [bar]
Δp_H	Höhenverlust [bar]
Δp_L	Druckverluste in der Rohrleitung [bar = Pa] (nur Kapitel 2.1)
Δp_R	Druckverluste in den Reaktoren [bar] (nur Kapitel 2.1)
Δp_R	Rohrreibungsverlust [bar]
Δx	Leitungslänge zwischen Entnahme- und Einleitstelle [m]
f_p	Funktion, welche bei unvollkommenem Brunnen den Anteil der nicht verfilterten Aquifermächtigkeit berücksichtigt (KOZENY-Gleichung)
g	Erdbeschleunigung: 9,81 m/s ²
k	Rauhigkeit [m]
k	Durchlässigkeit [m/s]
K_H	Horizontale Durchlässigkeit [m/s]
λ	Rohrreibungszahl [-]
m	Masse [kg]
\dot{m}	Fracht [kg/s]
MFV	Minimale Fließgeschwindigkeit [m/s]
p	Druck [1 bar = 10 ⁵ Pa]
q	Spezifischer Durchfluß [m ³ /(s*m)]
Q	Volumenstrom = Durchfluß [m ³ /s]
r	Brunnenradius oder Filterradius [m]

R	Reichweite des Brunnens [m] (Berechnung z. B. nach der JACOB-Gleichung)
ρ	Dichte [kg/m ³]
t	Zeit [s], Standzeit [z. B. d]
v	Geschwindigkeit [m/s]
V	Volumen [m ³]
\vec{v}_f	Fließgeschwindigkeit Grundwasser (Richtung) [m/s]
y	Beladungskapazität Aktivkohle [kg/kg]

Indizes

A	Aktivkohle
E	Einbauten
F	Aktivkohlefilter
H	Höhe
i	innen
R	Rohrleitung
S	Schadstoff

1 EINLEITUNG

Prinzipiell können technische Verfahren zur Sanierung eines Standortes unterschieden werden nach *In-situ Verfahren*, bei denen die Behandlung des kontaminierten Bodens und Grundwassers im Aquifer selbst ohne Bodenaushub durchgeführt wird, und nach *Ex-situ Verfahren*, bei denen das kontaminierte Material nach Auskoffnung außerhalb des Untergrundes behandelt wird. Letztere werden wiederum unterschieden in *On-site Verfahren* mit Behandlung des kontaminierten Materials oder des Grundwassers außerhalb des Untergrundes, jedoch am Standort der Kontamination und *Off-site Verfahren* mit Behandlung in einer zentralen Anlage an einem anderen Standort (FRANZIUS ET AL. 1995).

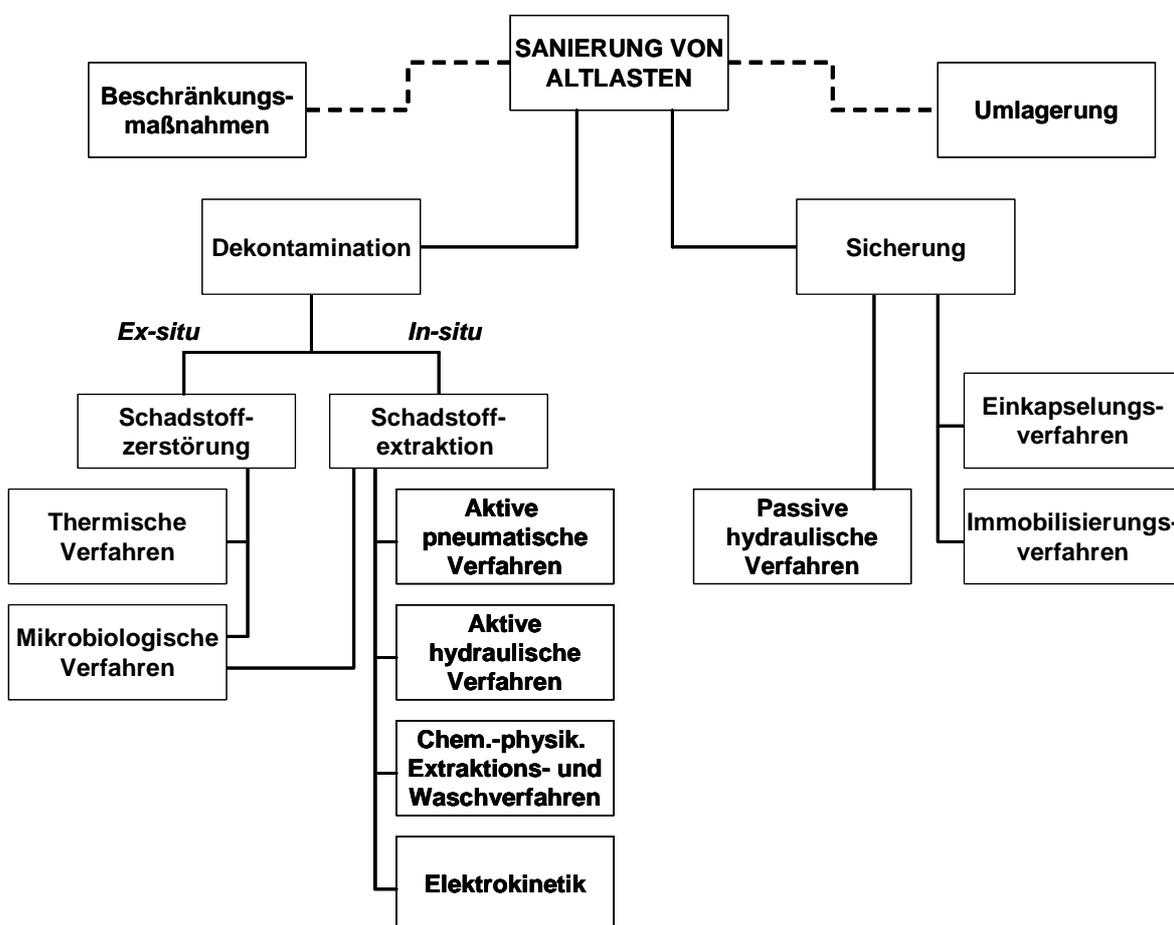


Abbildung 1: Übersicht über gängige Sanierungsverfahren (SCHRENK 2003)

Als Ex-situ Verfahren kommen meist thermische oder mikrobiologische Verfahren zum Einsatz oder auch Extraktionsverfahren (Bodenwäsche). Bei den heute bekannten In-situ Verfahren können grundsätzlich aktive und passive Verfahren differenziert werden.

Die aktiven Verfahren unterscheiden sich von den passiven dadurch, daß hier durch induzierte Maßnahmen unter Einbringung von Energie in verschiedener Form kontinuierliche oder diskontinuierliche Eingriffe auf den Boden oder das Grundwasser erfolgen, z. B. Wasserentnahme durch Pumpen, Injektion von Luft oder Einsatz elektrischer Energie. Weiterhin kann danach differenziert werden, ob Hilfsstoffe wie z. B. Tenside oder Alkohole für einen beschleunigten Schadstoffaustrag zum Einsatz kommen (Extraktionsverfahren) oder nicht (**Abbildung 1**).

Zu den gängigen Sicherungsverfahren zählen passive hydraulische Verfahren sowie Einkapselungs- und Immobilisierungsverfahren (**Abbildung 1**). Im Gegensatz zu einer Dekontamination führt eine Sicherung nicht zur Reinigung von Boden und Grundwasser. Eine Sicherung hat primär das Ziel, einen Austrag von Schadstoffen aus der betreffenden Altlast zu unterbinden.

Das in der Vergangenheit am häufigsten angewandte Verfahren zur Sicherung von Abstromfahnen ist das Pump and Treat-Verfahren (kurz: P + T). Hierbei wird eine hydraulische Maßnahme in Form der Grundwasserentnahme mit der Reinigung des geförderten Grundwassers durch eine geeignete On-site Behandlungsanlage kombiniert. Als Reinigungsverfahren werden in den meisten Fällen Aktivkohleadsorption und Strippen (= Ausgasung bzw. Verflüchtigung der Schadstoffe aus dem Wasser in die Strippluft) eingesetzt. Kennzeichnend für die P + T-Maßnahmen sind in den meisten Fällen sehr lange Betriebszeiträume (mehrere Jahrzehnte), vor allem falls eine Dekontamination des Schadensherdes nicht möglich ist. Diese sind in erster Linie auf die vergleichsweise geringen Löslichkeiten der meisten organischen Schadstoffe in Verbindung mit dem Auftreten von Schadstoffphasen zurückzuführen. Über die Betriebsdauer summieren sich entsprechend die Kosten für den Energiebedarf und die Wartung der Pumpen sowie den Austausch von Filtermaterialien, um nur die wichtigsten Kostenpunkte zu nennen.

Als Alternativen zum Pump and Treat wurden in den letzten Jahren beispielsweise passive Reaktive Systeme diskutiert, bei denen das Grundwasser nicht gefördert wird, sondern die Reinigung passiv in Reaktoren mit geeigneten Materialien abläuft. Das bekannteste dieser Verfahren ist das sogenannten Funnel and Gate-Verfahren, bei dem das mit Schadstoffen belastete Grundwasser zunächst mittels eines vertikalen Dichteelementes gefaßt und dann durch ein mit reaktiven Materialien gefülltes „Tor“ geleitet wird. Diese Systeme sind jedoch durch relative hohe Investitionskosten für die unterirdischen Bauwerke wie Dichtelemente und Untertagereaktoren gekennzeichnet.

Auch die aufwendige Kontrolle des Sanierungserfolges und die Wartung der Untertagereaktoren sind wichtige Kostenpunkte.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es deshalb, ein neues, innovatives Grundwasser-sanierungsverfahren, das sowohl kostengünstig ist als auch bezüglich der verfahrensbedingten Umweltbelastungen erhebliche Vorteile gegenüber derzeit angewandten Sanierungsverfahren aufweist, an typische innerstädtische Randbedingungen anzupassen und damit für eine Vielzahl noch nicht sanierter Altlasten anwendbar zu machen.

Bei diesem ebenfalls passiven Grundwassersanierungsverfahren handelt es sich um das sogenannte (Dichtwand-)Heber-Reaktor-Verfahren (kurz: DHR), das im folgenden **Kapitel 2** vorgestellt und diskutiert wird. Im Laufe des Forschungsvorhabens war vorgesehen, die Tauglichkeit dieses Verfahrens mittels großskaliger Labor- und Technikumsversuche zu prüfen, den Anlagenbetrieb zu optimieren, die Betriebssicherheit und Reinigungseffizienz bei allen Betriebszuständen und für spezielle Randbedingungen nachzuweisen und gegebenenfalls erforderliche Zusatzeinrichtungen zu entwickeln. Auf Basis der Ergebnisse sollten die Planungsgrundlagen für Feldanwendungen abgeleitet werden.

Im Rahmen einer Pilotstudie an einem schwierigen, realen Schadensfall wie dem „Öl-Epple“-Areal in Stuttgart – dichte Bebauung und Infrastruktureinrichtungen, Mischkontamination mit leicht- und schwerflüchtigen organischen Schadstoffen, gelöst und in Phase, schwankende Grundwasserstände sowie Hanglage mit daraus resultierenden großen Flurabständen – sollte die Praxistauglichkeit demonstriert sowie durch Nachweis ökonomischer und ökologischer Vorteile das Verfahren marktreif gemacht werden.

2 DAS DICHTWAND-HEBER-REAKTOR-VERFAHREN (DHR)

2.1 Verfahrensbeschreibung

Von der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS (Stuttgart) und dem Grundwasserforschungsinstitut Luckner & Partner GFI (Dresden) wurde ein Verfahren zur Grundwassersanierung mittels (Dichtwand-)Heber-Reaktor (DHR) entwickelt und zum Patent angemeldet (PCT/DE 9904003). Das Patent wurde Anfang des Jahres 2004 unter der Nummer 198 59 862 erteilt.

Anstelle eines durch eine Pumpe erzeugten Druckunterschiedes zwischen Aquifer und Förderbrunnen nutzt das Heber-Reaktor-Verfahren ein vorhandenes (ausreichendes) Grundwassergefälle zur Förderung des Grundwassers nach dem bekannten Heberprinzip (**Abbildung 2**). Das kontaminierte Grundwasser wird über einen oder mehrere Standardbrunnen oder ein Drainagesystem gefördert, je nach Art und Menge der Schadstoffe in verschiedenen Reaktoren, die in das Hebersystem integriert sind, gereinigt und an einer Stelle niedrigeren hydraulischen Potentials wieder eingeleitet. Dies kann entweder der Aquifer selbst (Reinfiltration), ein Vorfluter (Direkteinleitung) oder ein Abwasserkanal (Indirekteinleitung) sein.

Wesentliche Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Verfahrens sind:

1. Das Gefälle zwischen Grundwasserentnahme und -einleitung ist ausreichend (mind. 0,5-1 ‰), bzw. der Potentialunterschied zwischen Entnahme und Rückgabe ist größer als 0,5-1 m.
2. Der Grundwasserflurabstand beträgt weniger als 8 m.

Falls kein ausreichendes natürliches Grundwassergefälle vorhanden ist, kann eine in den Grundwasserleiter eingebrachte Dichtwand die nötige Potentialdifferenz erzeugen, um die Förderung des Grundwassers nach dem Heberprinzip zu ermöglichen (**Abbildungen 3 und 4**). Der Einsatz dieser Variante ist möglich, falls die Dichtwand in eine unterhalb des zu sanierenden Aquifers liegende undurchlässige Schicht (Grundwasserstauer) eingebunden werden kann. Ansonsten besteht, wie auch beim Funnel and Gate-Verfahren, die Gefahr der Unterströmung der Dichtwand.

Beträgt der Grundwasserflurabstand mehr als 8 m, ist zu prüfen, ob die Reaktoren Unterflur aufgestellt werden können (z. B. Kellerraum) oder ob der Bau einer Dichtwand zum Aufstau des Grundwassers möglich ist und deren Kosten vertretbar sind.

Die Beschränkung des Verfahrens auf Grundwasserflurabstände < 8 m ist folgendermaßen zu begründen: Bei der Wasserförderung im Heberbetrieb treten oberhalb des Entnahmepunktes Unterdrücke auf; eine Wassersäule von 10 m entspricht dabei in etwa einem Unterdruck von 1 bar. Bei diesem Unterdruck verdampft das Wasser. Da außer der Höhendifferenz auch noch Reibungsverluste in den Rohrleitungen und Reaktoren, die zu einer Druckminderung führen, zu berücksichtigen sind (siehe **Kapitel 2.7.3**), ist das Verfahren für die Praxis auf den genannten Flurabstand von < 8 m zu beschränken.

Je nachdem, ob eine Dichtwand zum Einsatz kommt oder nicht, ist zwischen Dichtwand-Heber-Reaktor-Verfahren (DHR) oder Heber-Reaktor-Verfahren (HR) zu unterscheiden.

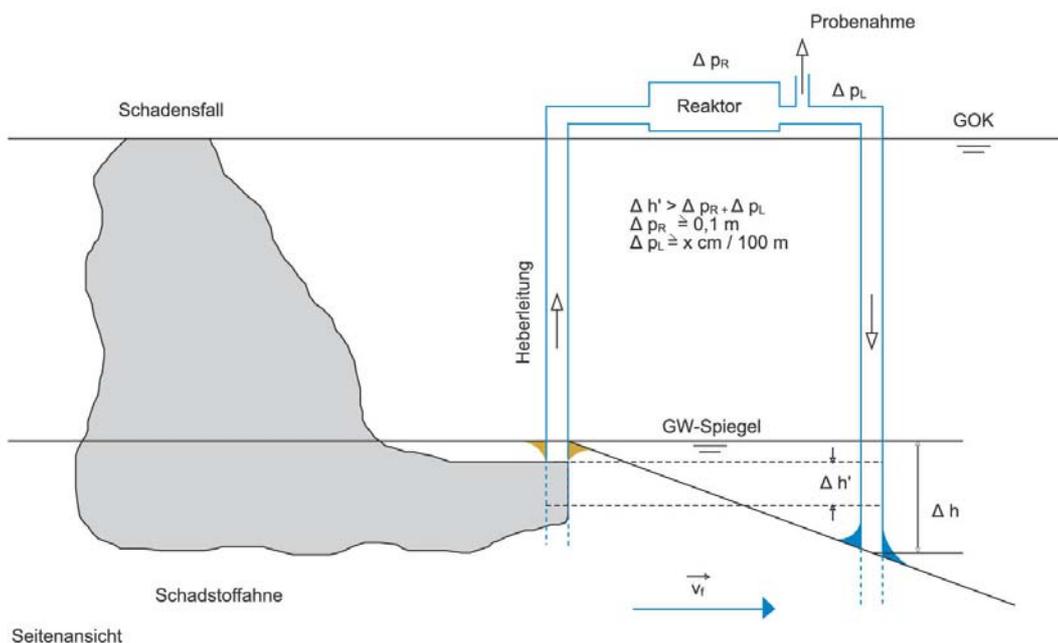


Abbildung 2: Heber-Reaktor-Verfahren (HR)

- Δh Theoretische Potentialdifferenz zwischen Entnahme- und Einleitstelle [m]
- $\Delta h'$ Real vorhandene Potentialdifferenz zwischen Entnahme- und Einleitstelle [m]
- Δp_L Druckverluste in der Rohrleitung [bar]
- Δp_R Druckverluste in den Reaktoren [bar]
- \vec{v}_f Fließgeschwindigkeit Grundwasser (Richtung) [m/s]

In **Abbildung 2** ist das Funktionsprinzip des Heber-Reaktor-Verfahrens (HR) und dessen Einsatz zur Sicherung einer Schadstofffahne vereinfacht dargestellt. Die Förderung im Heberverfahren („Gravitationspumpe“) beruht darauf, daß die Entnahme des kontaminierten Grundwassers an einem Punkt höheren Potentials erfolgt als die Wiedereinleitung des gereinigten Grundwassers. In die Heberleitung sind mindestens zwei Reaktoren, meist Aktivkohlefilter, integriert, von denen einer als „Polizeifilter“ fungiert.

Der Betrieb der Reaktoren erfolgt je nach Lage zum Grundwasserspiegel im Unterdruck oder im Überdruck. Der in **Abbildung 2** schematisch dargestellte Reaktor befindet sich oberhalb des Grundwasserspiegels, d. h. im Unterdruckbereich. In Fällen, in denen die Reaktoren auf geodätisch niedrigerem Niveau als dem Niveau des Grundwasserspiegels aufgestellt werden können, ist auch ein Überdruckbetrieb möglich.

Zur Kontrolle des Sanierungserfolges können vor dem ersten und nach dem letzten Reaktor Proben entnommen und analysiert werden. Für die genaue Gestaltung einer realen Heber-Reaktor-Anlage sei auf **Kapitel 2.7.2** verwiesen.

Das Schema verdeutlicht auch, daß eine ausreichende Potentialdifferenz, d. h. ein ausreichendes Grundwassergefälle vorhanden sein muß, damit die Förderung nach dem Heberprinzip funktionieren kann. Zu beachten ist hierbei, daß die real vorhandene Potentialdifferenz $\Delta h'$ zwischen der Entnahme- und Einleitstelle des Grundwassers kleiner ist als die theoretische Δh , da sich an der Entnahmestelle der Grundwasserspiegel absenkt, während er sich an der Einleitstelle erhöht. Weiterhin muß die Potentialdifferenz größer sein (in der Praxis $> ca. 1\text{ m}$) als die Summe der Druckverluste in der Rohrleitung Δp_L und in den Reaktoren Δp_R . Zur Abschätzung der Druckverluste finden sich Erläuterungen in **Kapitel 2.7.3**.

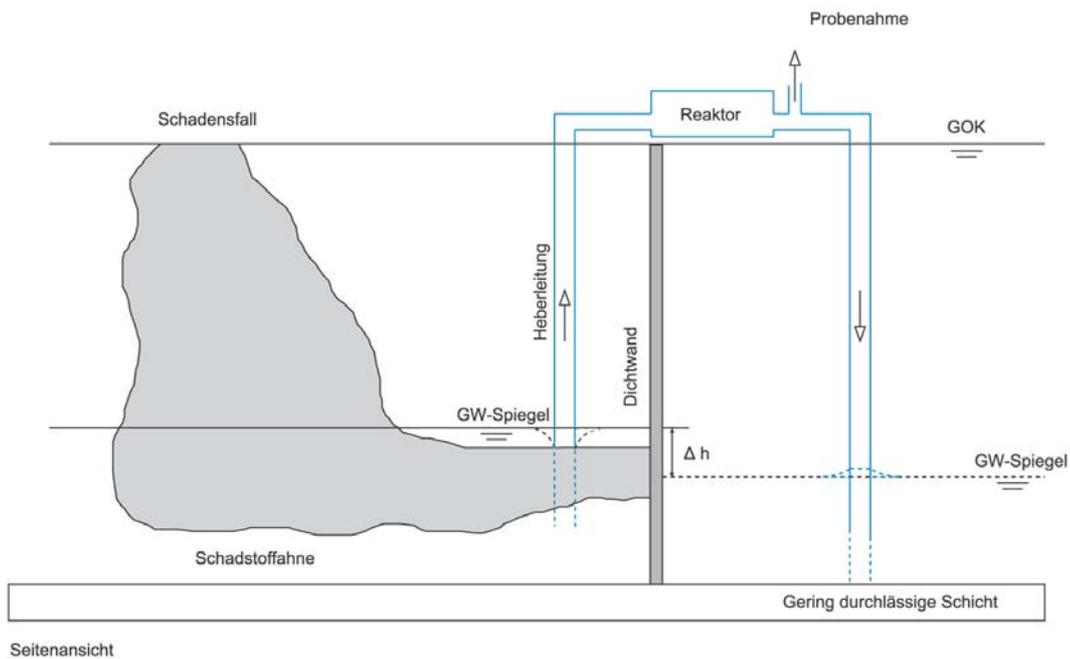


Abbildung 3: Dichtwand-Heber-Reaktor-Verfahren (DHR) – Seitenansicht

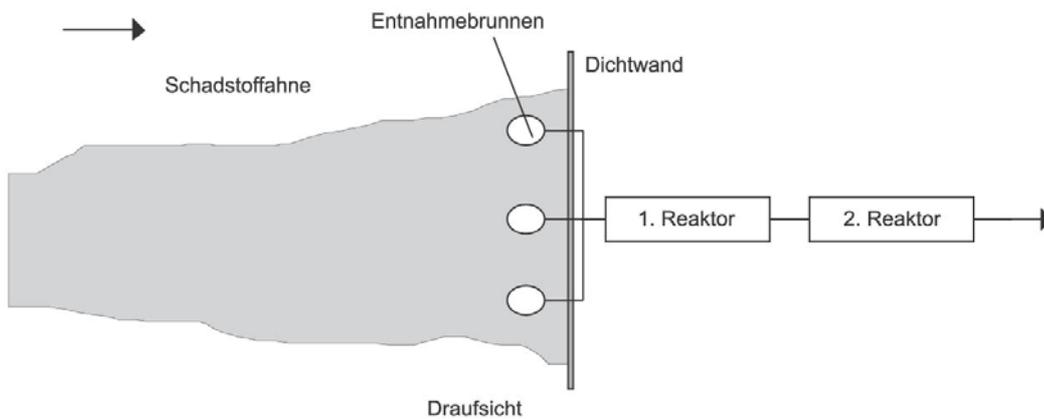


Abbildung 4: Dichtwand-Heber-Reaktor-Verfahren (DHR) – Draufsicht

2.2 Vorteile

Das Verfahren bietet die Möglichkeit, mehrere Schadstoffe, d. h. Schadstoffgemische, durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Reaktortypen auf einfache Weise zu beseitigen (**Abbildung 4**).

Die Anwendung des DHR-Verfahrens ist auch über mehrere Grundwasserstockwerke möglich: z. B. kann das Grundwasser eines höher liegenden belasteten Aquifers nach dem Heberprinzip gefördert, in entsprechenden Reaktoren gereinigt und dann in einen tiefer liegenden unbelasteten Aquifer eingeleitet werden (siehe **Kapitel 5.3**).

Gegenüber dem Pump and Treat-Verfahren (P+T) bietet das DHR-Verfahren den Vorteil, daß keine Pumpen zur Förderung des Grundwassers erforderlich sind, d. h. kein Energieverbrauch stattfindet und somit keine Energiekosten über lange Zeiträume anfallen, keine Steuerung und Wartung der Pumpen, keine Pumpenreparaturen und kein Pumpenersatz erforderlich sind, und daß die Ausfallsicherung aufgrund des extrem einfachen Prinzips sehr viel höher ist (siehe **Kapitel 4**).

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist die Selbststeuerung des Systems über die Potentialdifferenz zwischen Entnahme und Einleitung. Selbststeuerung bedeutet, daß sich der Durchfluß durch die Heber-Reaktor-Anlage dem jeweils vorliegenden Grundwassergefälle anpaßt. Durch die natürlicherweise auftretenden Schwankungen des Grundwasserspiegels variiert der Durchfluß durch das System, was jedoch keinen Einfluß auf die Reinigungsleistung hat. Ein kontinuierlicher Betrieb ist dadurch auch bei geringer Ergiebigkeit möglich.

Gegenüber den passiven Funnel and Gate-Systemen, bei denen das reaktive oder sorptive Material in den Grundwasserleiter selbst eingebaut wird, ergeben sich erhebliche Vorteile bei den Baukosten, da der technisch aufwendige und damit teure Untertage-reaktor (Gate) durch einen einfachen gut zugänglichen oberirdischen Reaktor ersetzt werden kann. Auch bei der Funktionsüberwachung des Systems – die Reinigung des kontaminierten Wassers muß nur im Ablauf kontrolliert werden –, bei der Kontrolle der Sanierungseffizienz und beim Ausbau bzw. Ersatz des reaktiven Materials nach dessen Beladung ergeben sich beträchtliche Kostenvorteile. Bei tiefen Grundwasserleitern bzw. tief liegenden Kontaminationen ist die Anwendung des Funnel and Gate-Verfahrens extrem teuer oder ggf. nicht möglich. Hier kann das DHR-Verfahren eine Alternative

bieten, da dessen Anwendung, wie erwähnt, auch über mehrere Grundwasserstockwerke möglich ist.

Neben den ökonomischen und ökologischen Vorteilen zeichnet sich das DHR-Verfahren gegenüber anderen neu entwickelten Sanierungsverfahren dadurch aus, daß alle wesentlichen Anlagenteile (Dichtwand, Saugheber, Reaktoren) in anderen technischen Bereichen bereits langfristig eingesetzt und erprobt sind. Daher ist zu erwarten, daß nach entsprechenden Pilotvorhaben kurzfristig betriebssichere DHR-Anlagen verfügbar sein werden. Diesen Vorteilen steht als einziger gravierender Nachteil die Beschränkung auf Anwendungen mit einem Grundwasserflurabstand von maximal etwa 8 m entgegen.

In den folgenden **Kapiteln 2.3 und 2.4** werden das Pump and Treat-Verfahren und die Funnel and Gate-Systeme kurz beschrieben und der Alternative DHR gegenübergestellt.

2.3 Pump and Treat-Verfahren versus DHR-Verfahren

Die gezielte Entnahme von Grundwasser, das sogenannte **Pump and Treat**, stellt das einfachste aber weitaus am häufigsten angewandte hydraulische Sanierungsverfahren dar. Wesentliches Kriterium für die Durchführbarkeit ist dabei die Durchströmbarkeit des kontaminierten Aquifers mit Wasser. Die Entnahme kann insbesondere folgende Ziele haben:

- Entfernung der Grundwasserbelastung (Dekontamination);
- Unterbindung von Emissionen (Sicherheit).

Im allgemeinen werden dabei im Grundwasserströmungsfeld eine oder mehrere Fassungsanlagen (Brunnen, Drainagen) so im Verhältnis zur Ausdehnung der Kontamination eingerichtet und betrieben, daß

- der belastete Grundwasserbereich möglichst vollständig erfaßt wird,
- eine möglichst effektive Entfernung der Belastungen erfolgt.

Abbildung 5 skizziert die Fassung einer Schadstofffahne mit im Grundwasser gelösten Kontaminanten.

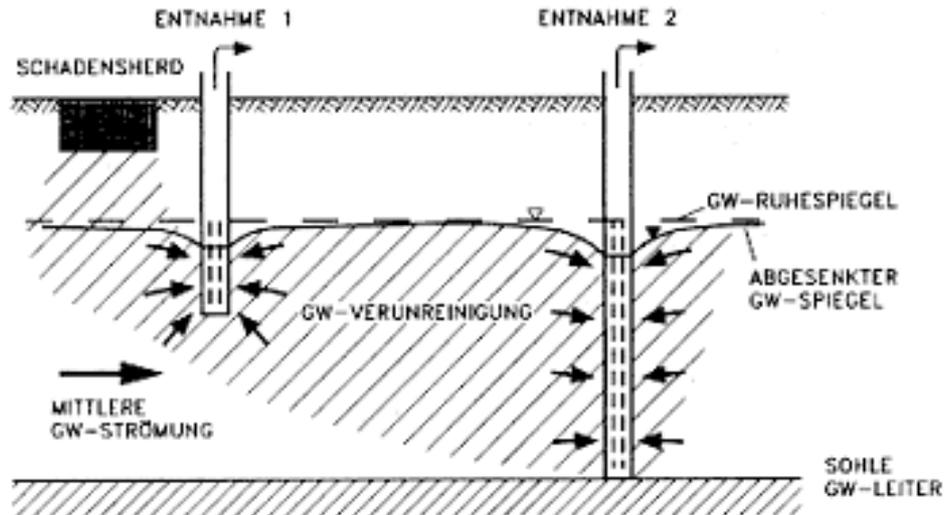


Abbildung 5: Prinzipskizze Grundwasserentnahme zur Fassung einer Schadstofffahne (gelöst) im Grundwasser (LFU 1995)

Entnahmeverfahren werden häufig als Sofortmaßnahmen eingesetzt, da sie im allgemeinen prinzipiell eine Situationsverbesserung der Stoffausbreitung darstellen. Die Wirksamkeit der Entnahmeverfahren hängt von einer sachgerechten Anpassung an die örtlichen Verhältnisse ab. So sind für die sichere Verhinderung von Emissionen ins Umfeld die zeitlichen und räumlichen Variationen der Grundwasserströmungsverhältnisse zu berücksichtigen (LFU 1995).

Das über Pumpen (**pump**) geförderte Grundwasser ist in einer für den Anwendungsfall entsprechend konzipierten Reinigungsanlage zu reinigen (**treat**). Als Reinigungsverfahren werden für organische Schadstoffe in den meisten Fällen Aktivkohleadsorption und Strippen eingesetzt. Die Sorption auf Aktivkohle eignet sich für die meisten gelösten organischen Schadstoffe (z. B. MKW, PAK, BTEX, CKW, PCB, Phenole, Pestizide...). Das Strippen wird meist für gelöste leichtflüchtige Schadstoffe (z. B. LCKW) in relativ hohen Konzentrationen ($> 1 \text{ mg/l}$) eingesetzt; nach Entfernung der Schadstoffe aus dem Wasser ist die schadstoffbeladene Abluft über Luftaktivkohlefilter zu reinigen (zur Eliminierung von Schadstoffen siehe auch **Kapitel 2.6 und 2.7.4**).

Unter dem Gesichtspunkt der Aufrechterhaltung der Grundwasserbilanz wird heute die Wiederversickerung des von Schadstoffen befreiten Grundwassers angestrebt. In den Fällen, in denen eine Reinfiltration aufgrund von Standortgegebenheiten nicht möglich ist, wird das Grundwasser dem Vorfluter (Direkteinleitung) bzw. dem Regenwasser- oder Schmutzwasserkanal (Indirekteinleitung) zugeführt.

Heute liegen über 20 Jahre Erfahrung mit diesem Sanierungsverfahren vor. Die Erfahrung aus Langzeitsanierungsprojekten lehrt, daß bei vielen und insbesondere größeren Grundwasserschäden wie z. B. im Falle der CKW oder MKW sehr lange Zeiträume zur Sanierung erforderlich sind (mehrere Jahrzehnte). Der Grund für die lange Dauer der Sanierungen bei organischen Schadstoffen ist darin zu sehen, daß mit fortschreitender Sanierungszeit nur noch eine langsame oder gar keine Abnahme der Konzentrationen im Förderwasser der Sanierungsbrunnen erfolgt. Dieser Effekt wird auch als Tailing beschrieben und ist in erster Linie auf die vergleichsweise geringen Löslichkeiten der meisten organischen Schadstoffe und deren Sorption am Korngerüst in Verbindung mit dem Auftreten von Schadstoffphasen zurückzuführen.

Die geringe Löslichkeit führt dazu, daß das vorbeiströmende Grundwasser die Schadstoffe nur bis zu einer Sättigungskonzentration aufnehmen kann (Sättigungslänge). In Fällen, in denen der Schadensherd nicht saniert werden kann, führt dies zu einer langdauernden Nachlösung von Schadstoffen in das Grundwasser. Über die Betriebsdauer summieren sich entsprechend die Kosten für den Energiebedarf und die Wartung der Pumpen sowie den Austausch von Filtermaterialien, um nur die wichtigsten Kostenpunkte zu nennen.

Hier stellt das Heber-Reaktorverfahren, falls die Voraussetzungen für eine Anwendung erfüllt sind, die kostengünstigere Alternative dar. An dem betreffenden Standort ist zunächst zu prüfen, ob ein ausreichendes Grundwassergefälle zwischen dem Entnahmepunkt und einer in Frage kommenden Einleitstelle besteht. Ist dies der Fall, so sollte der Flurabstand < 8 m sein. Ist der Flurabstand > 8 m, so kann dies fallweise (Kosten!) dadurch ausgeglichen werden, daß die Reaktoren Unterflur aufgestellt werden. Ist das Grundwassergefälle nicht ausreichend, kann durch den Bau einer Dichtwand eine ausreichende Potentialdifferenz erzeugt werden. In jedem Fall ist zu prüfen, ob sich die Investitionskosten über die anvisierte Betriebsdauer des DHR-Verfahrens amortisieren oder ob das Pump and Treat-Verfahren die günstigere Alternative darstellt (vgl. **Kapitel 2.7.1**).

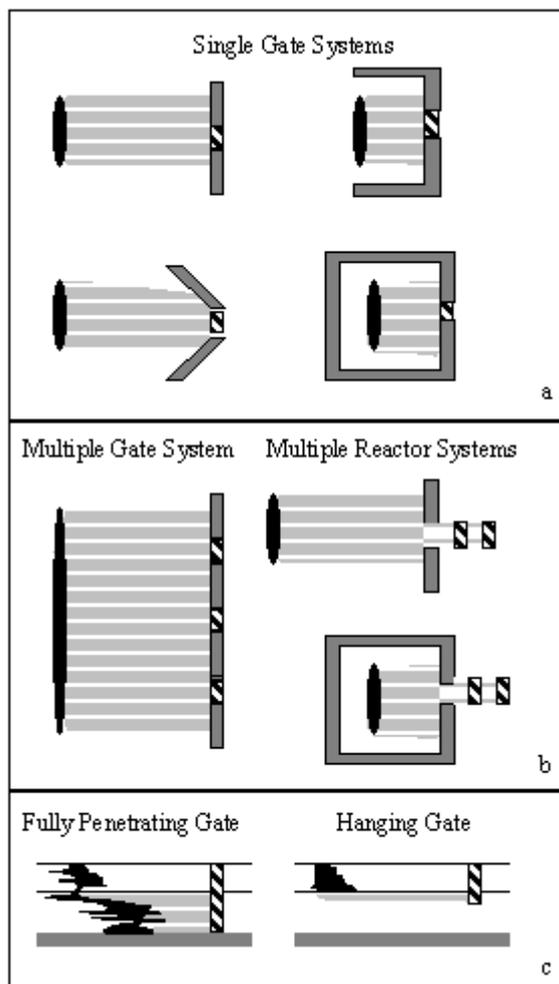
2.4 Funnel and Gate-Systeme versus DHR-Verfahren

In der Regel werden reaktive Wände als passives Langzeitsicherungssystem betrieben, d. h. der Fluß des kontaminierten Grundwassers durch die reaktive Wand wird allein von den natürlich gegebenen hydraulischen Gradienten kontrolliert. Um nicht extrem große reaktive Wände in den Untergrund einbringen zu müssen und den Durchfluß des kontaminierten Grundwassers effizient zu gestalten, werden die reaktiven Wände meist als sog. Funnel and Gate-System (**Abbildung 6 a**) konzipiert. Bei diesem System wird die kontaminierte Grundwasserabstromfahne mit z. B. in den Untergrund eingebrachten Absperrwänden (**Funnel**) (z. B. Stahlspundwände oder "slurry walls") oder mittels horizontaler Zementbohrlochinjektionen gefaßt und durch eine oder mehrere reaktive Wände (**Gate**) geleitet (LFU 1997).

Als reaktive Wände lassen sich je nach Art der stattfindenden Prozesse fünf Typen unterscheiden, wobei in der Anwendung häufig Mischformen existieren: pH-Redox-reaktive Wände (z. B. elementares Eisen), Fällungs-reaktive Wände, Sorptions-reaktive Wände, Nährstoff freisetzende-reaktive Wände und Physikalisch-reaktive Wände.

Die Wahl der Absperrwände richtet sich in der Regel nach ökonomischen Gesichtspunkten, die durch Faktoren wie geologische Gegebenheiten, Art der Kontaminanten, Erstreckung der kontaminierten Grundwasserfahne und Bebauungssituation bestimmt werden. Da die Investitionskosten, d. h. in der Hauptsache die Baukosten, bei Funnel and Gate-Systemen wie auch bei einfachen Reaktionswänden der Hauptfaktor sind, werden zur Zeit eine Reihe von verschiedenen geotechnischen Entwicklungen verfolgt, welche die Baukosten auch für geologisch schwierige Fälle zukünftig bedeutend minimieren könnten (LFU 1997).

Zwei gegensätzliche Faktoren müssen bei der Dimensionierung von Funnel and Gate-Systemen beachtet werden. Zum einen sollte der Durchfluß durch die reaktive Wand möglichst maximiert werden, um einen möglichst großen Einzugsbereich zu erfassen. Zum anderen ist auch eine möglichst lange Retentionszeit des Grundwassers bzw. der Kontaminanten in der reaktiven Wand anzustreben. Die Aufenthaltszeit des Grundwassers muß dabei so bemessen werden, daß die Kontaminanten durch Reaktionen in der reaktiven Wand bis auf die gesetzlich vorgegebenen bzw. angestrebten Grenzkonzentrationen abgebaut bzw. fixiert werden.



Der Einzugsbereich von einem Funnel and Gate-System steht im direkten Zusammenhang mit dem Durchfluß durch das Gate bzw. die reaktive Wand. Der Durchfluß durch diese kann dabei durch die Dimensionierung der Breite, Länge und hydraulischen Durchlässigkeit der reaktiven Wand wie auch durch die Breite des Trichters (Funnel) kontrolliert werden.

Abbildung 6: Prinzipskizze von Funnel & Gate-Systemen (STARR & CHERRY 1994)

Für eine gegebene Länge des Funnel and Gate-Systems besitzt in einem isotropen Aquifer die Trichterkonfiguration mit einem Öffnungswinkel von 180° , senkrecht zur Grundwasserfließrichtung, die höchste Effizienz. Andere Konfigurationen, d. h. Trichteröffnungswinkel $< 180^\circ$ bzw. mehrfache reaktive Wände, sog. "multiple gates", weisen jedoch einen größeren Einzugsbereich bei variierenden Grundwasserstromrichtungen auf und sind bei solchen Gegebenheiten vorzuziehen. Durch eine fast vollständige Einkapselung der Schadstoffquelle wird erreicht, daß die reaktive Wand den einzigen permeablen Abstrombereich bildet. Der Grundwasserstrom ergibt sich in diesem Fall nur aus der Grundwasserneubildung im eingekapselten Bereich (**Abbildung 6 b**) (LFU 1997).

Ein besonderer Typ der reaktiven Wand kann für Schadensfälle angewendet werden, bei denen die Kontamination die Basis des Grundwasserleiters nicht erreicht hat bzw. auch nicht erreichen wird (LNAPL-Schadensfälle). Für diese Fälle wurden sog. hängende reaktive Wände konzipiert (**Abbildung 6 c**).

Ein besonderer Typ der reaktiven Wand kann für Schadensfälle angewendet werden, bei denen die Kontamination die Basis des Grundwasserleiters nicht erreicht hat bzw. auch nicht erreichen wird (LNAPL-Schadensfälle). Für diese Fälle wurden sog. hängende reaktive Wände konzipiert (**Abbildung 6 c**).

Die Sanierungseffizienz von Funnel and Gate-Systemen wird im wesentlichen durch die richtige Positionierung und Dimensionierung der Absperr- und reaktiven Wände bestimmt. Problematisch sind dabei vor allem (große) hydraulische Heterogenitäten, die in der Regel

eine intensive Erkundung des Aquifers notwendig machen, um (teure) Überdimensionierungen des Funnel-Systems und Unterdimensionierungen des Gate-Systems zu vermeiden. Standortspezifisch stellt sich hier die Frage, ob der Erkundungsaufwand intensiviert oder aber das Funnel and Gate-System mit einem größeren Sicherheitsfaktor ausgelegt werden soll (LFU 1997).

Wesentliche Kostenfaktoren bei der Realisierung von Funnel and Gate-Systemen sind die Kosten für das Untertagebauwerk sowie während des Betriebs die Kosten für den Austausch des reaktiven Materials – nach vollständiger Beladung, infolge von Clogging-Effekten oder der Bildung von bevorzugten Wegsamkeiten – und für die Kontrolle der Sanierungseffizienz. Hierzu sind Grundwasserprobenahmen an mehreren Stellen (horizontal und vertikal) im Abstrom des Gates erforderlich.

Zudem sei darauf hingewiesen, daß sich bei Standorten im Stadtbereich der Bau einer geschlossenen Dichtwand als problematisch erweisen kann (Bebauung, Kanalsystem).

Für Standorte, an denen die Installation von Funnel and Gate-Systemen oder permeablen Reaktionswänden entweder aus technischen oder finanziellen Gründen nicht machbar ist, sind deshalb hydraulische Alternativen gefragt. Genannt werden in der Literatur (LFU 1997) z. B. verschiedene Anordnungen von Brunnengalerien, die reaktive Materialien enthalten, oder auch die Nutzung von Drainagesystemen und Stollen oder die Verwendung von Horizontalbohrungen zum Aufbau von Reaktionszonen.

Wesentliche Kosteneinsparungen sind jedoch möglich, wenn die Reaktoren oberirdisch ausgeführt werden können. Hier bietet das (Dichtwand-)Heber-Reaktor-Verfahren unter bestimmten Voraussetzungen verschiedene Alternativen:

1. Der Grundwasserflurabstand beträgt weniger als 8 m, was die Förderung des Grundwassers nach dem Heberprinzip über
 - a) Sanierungsbrunnen oder
 - b) Drainagesystemeermöglicht.

2. Der Grundwasserflurabstand ist größer als 8 m, jedoch kann dies dadurch ausgeglichen werden, daß die Reaktoren Unterflur aufgestellt werden.

Eine Dichtwand kann fallweise erforderlich sein, um ein ausreichendes Grundwassergefälle ($> 0,5-1\%$) zu erzeugen.

Nach Reinigung des Grundwassers in oberirdischen oder oberirdisch zugänglichen Reaktoren kann das gereinigte Wasser in einen tiefer liegenden, nicht kontaminierten Aquifer, einen Vorfluter oder einen Abwasserkanal eingeleitet werden.

Im folgenden **Kapitel 2.5** werden die DHR-Versuchsanlage bei VEGAS und die mit dieser Anlage durchgeführten Untersuchungen zur Schaffung von Planungsgrundlagen für Praxisfälle beschrieben.

2.5 DHR-Versuchsanlage bei VEGAS

Im Laufe des Jahres 2001 wurde bei VEGAS eine DHR-Versuchsanlage im technischen Maßstab konzipiert und aufgebaut (**Abbildung 7**), um die Funktionsfähigkeit, die Betriebsweise und mögliche Einschränkungen im Realmaßstab zu prüfen und damit die vor der Anwendung in der Praxis notwendigen Voruntersuchungen durchzuführen.

Zwei übereinander gestellte Container (**Abbildung 9**) im Untergeschoß der VEGAS-Versuchshalle simulieren die Grundwasserleiter am Entnahme- und Infiltrationspunkt und geben die Potentialdifferenz zur Förderung des Wassers nach dem Heberprinzip vor. Zum Anfahren einer Heberanlage muß zunächst das Gesamtsystem über eine Pumpe im Bypass gefüllt werden, danach kann auf stabilen Heberbetrieb (Betrieb ohne Pumpe) umgeschaltet werden.

Wie in **Kapitel 2.1** erläutert, ist der Betrieb der Reaktoren im Unterdruck oder im Überdruck möglich. Der Betrieb von Reaktoren zur Grundwasserreinigung erfolgt nach Stand der Technik im Überdruck. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte daher untersucht werden, wie die Reaktoren für den Unterdruckbetrieb zu gestalten und zu betreiben sind.

Im Erdgeschoß (**Abbildung 8**) befinden sich als Reaktoren ein Ölabscheider sowie ein Aktivkohlefilter (je 125 l Volumen), welche mit einem Unterdruck von bis zu -500 hPa (entspricht 5 m Wassersäule bzw. einem Grundwasserflurabstand von 5 m) betrieben werden. Zur Visualisierung der Vorgänge sind beide Reaktoren in Glas ausgeführt. Um sowohl die Drücke auf unterschiedlichen Höhenniveaus der Anlage sowie den Durchfluß

zu beobachten und zu erfassen, wurde eine automatische Meßdatenerfassung installiert. Beispiele der automatischen Meßdatenerfassung sind in **Kapitel 2.5.2** beschrieben.

DHR-Versuchsanlage

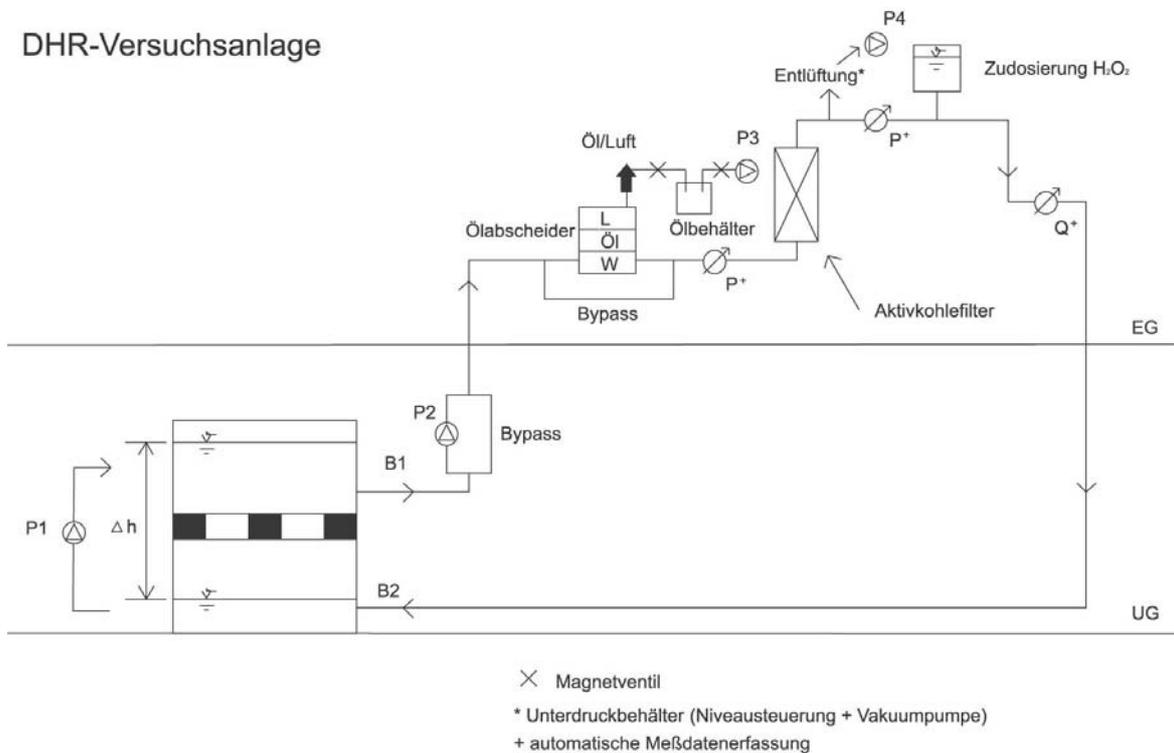


Abbildung 7: Fließbild der DHR-Versuchsanlage



Abb. 8: DHR-Versuchsanlage (EG)



Abb. 9: DHR-Versuchsanlage (UG)

Wie aus dem Fließbild der DHR-Versuchsanlage (**Abbildung 7**) zu ersehen ist, fließt das zu reinigende Wasser zunächst durch den Ölabscheider und dann durch den Aktivkohlefilter. Erstmals wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein Ölabscheider im Unterdruck betrieben. Die Funktionsweise des Ölabscheiders ist in **Abbildung 10** skizziert. Das Öl-Wasser-Gemisch fließt mittig in die Glassäule. Durch die Vergrößerung des Fließquerschnittes verlangsamt sich die Strömungsgeschwindigkeit so, daß sich Öl und Wasser gemäß dem Dichteunterschied auftrennen. Die Ölphase wird am oberen Auslauf intermittierend über eine Vakuumpumpe abgesaugt und in einem Behälter zur Entsorgung gesammelt. Das Wasser gelangt durch den unteren Auslauf weiter zum Aktivkohlefilter, in dem die gelösten organischen Stoffe aus dem Wasser entfernt werden.

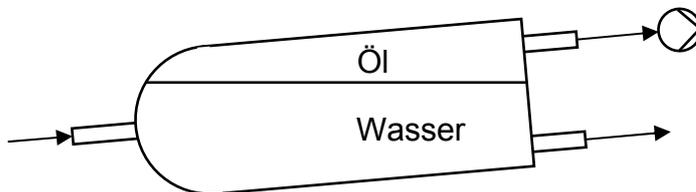


Abbildung 10: Prinzipskizze des Ölabscheiders

Wichtig beim Betrieb von Reaktoren im Unterdruck ist, daß sie luftdicht geschlossen sein müssen, damit keine Luft in das System eindringen kann. Dies würde zu einem Abreißen der Wassersäule und zum Stillstand des Hebers führen.

Wie die Untersuchungen auch mit Standortwasser vom Öl-Epple-Areal (siehe **Kapitel 3**) gezeigt haben, ist auch im Unterdruck ein stabiler Anlagenbetrieb bei hoher Reinigungsleistung gewährleistet. Zudem konnte durch Verwendung eines Tracers zur Visualisierung der Strömungsvorgänge die gleichmäßige Durchströmung der Reaktoren demonstriert werden. Zur Kontrolle des Reinigungserfolges wurden nach dem Aktivkohlefilter Proben entnommen.

Im Praxisfall werden die Reaktoren nicht aus Glas gefertigt, sondern wie auch die Rohrleitungen und Verbindungen meist aus HDPE (Polyethylen hoher Dichte). Hier ist die Wandstärke entsprechend zu wählen, um die Unterdruckstabilität zu gewährleisten. Dies gilt auch für die Rohrleitungen und alle weiteren Bestandteile der Anlage.

Für den Betrieb der Versuchsanlage wurden HDPE-Rohrleitungen mit einem Durchmesser von 50 mm (DN 50) und einer Wandstärke von 4,6 mm gewählt (Typ SDR 11), die

sich bei Drücken bis -0,7 bar als stabil erwiesen. Als Verbindungen wurden HDPE-Verschraubungen mit EPDM¹-Dichtungen verwendet.

2.5.1 Automatische Entlüftung

Am höchsten Punkt der Anlage befindet sich eine automatische Entlüftung, welche über eine Vakuumpumpe intermittierend betrieben wird (**Abbildungen 11 und 12**). Eine Entlüftungseinrichtung ist aus Gründen der Betriebssicherheit auch für den Anwendungsfall vorzusehen, um ein Abreißen der Wassersäule durch auftretende Gasblasen (Ausgasen von CO₂, N₂, O₂, leichtflüchtigen Schadstoffen...) und damit einen Stillstand des Hebers zu vermeiden.

Das Prinzip der automatischen Entlüftung beruht darauf, daß auftretende Gasblasen in einen am Hochpunkt der Anlage befindlichen, mit Wasser gefüllten Behälter entweichen und der Wasserstand im Behälter entsprechend absinkt. Im Behälter sind zwei Elektroden auf unterschiedlichem Niveau eingebaut. Unterschreitet der Wasserstand die untere Elektrode, dann wird mit einer Vakuumpumpe die Luft abgesaugt, bis der Wasserstand im Behälter die obere Elektrode erreicht.



Abbildung 11: Automatische Entlüftung – Wasserbehälter am Hochpunkt der Anlage mit Verbindung zur Vakuumpumpe)

Die Schaltung (**Abbildung 13**) regelt den Flüssigkeitsstand zwischen Max- und Min-Elektrode (oberer und unterer Wasserstand). Bei Erstinbetriebnahme ziehen die Hilfsrelais K 2 und K 3 an. Das Magnetventil öffnet die Leitung zur Vakuumpumpe, die gleichzeitig zu pumpen beginnt. Wenn der Wasserstand die obere (Max-)Elektrode erreicht hat, zieht das Niveaurelais K 1 an, und die Hilfsrelais K 2 und K 3 fallen ab, d. h. die Vakuumpumpe stoppt, und das Magnetventil schließt. Wenn nun der Wasserstand (durch Ausgasungen oder Leckagen) fällt und die untere (Min-)Elektrode unterschreitet, setzt

¹ EPDM = Ethylen-Propylen-Kautschuk als Terpolymer

wieder die Regelung, siehe oben, ein. Über den Abstand zwischen Min- und Max-Elektrode wird das Einschaltintervall bzw. die Einschaltdauer der Vakuumpumpe gesteuert.



Abbildung 12: Automatische Entlüftung – Niveausteuern und Vakuumpumpe

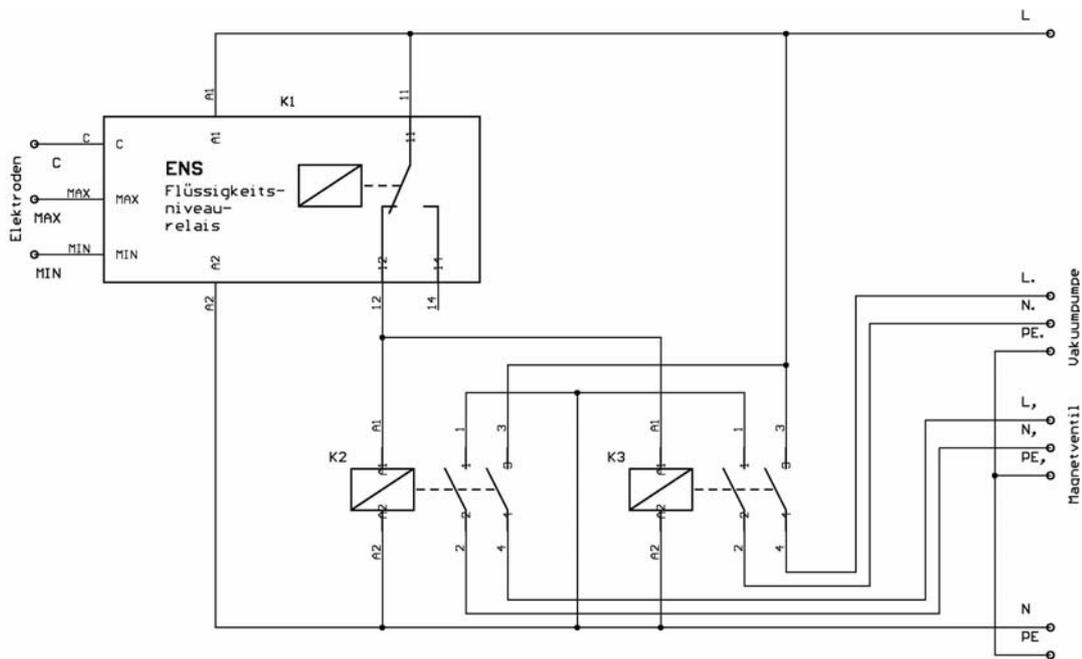


Abbildung 13: Schaltplan der automatischen Entlüftung

Im Praxisfall mit oftmals mehreren Entlüftungsanlagen (mehreren Hochpunkten) würde man zur Entlüftung einen zentralen Unterdruckbehälter (z. B. Windkessel) einsetzen, der mit allen Hochpunkten der Anlage verbunden ist und dessen Unterdruck über eine

Vakuumpumpe reguliert wird (siehe auch **Kapitel 2.7.2**).

2.5.2 Beispiele der automatischen Meßdatenerfassung

Zur Erfassung der Betriebszustände (Durchfluß, Unterdruck, Filterwiderstand...) sind sowohl bei der Versuchs- als auch bei der Sanierungsanlage geeignete Meßsysteme vorzusehen. Für die Grundlagenuntersuchungen und Betriebstests mit der DHR-Versuchsanlage wurde eine automatische Meßdatenerfassung installiert, da hier mehr Meßdaten als im Routinebetrieb erforderlich sind, um Planungsgrundlagen für Praxisfälle zu schaffen. Für den Routinebetrieb reichen z. B. Wasserzähler und Manometer zur Erfassung von mittleren Durchflüssen und Drücken.

Mit Hilfe der automatischen Meßdatenerfassung können die Durchfluß- und Druckverhältnisse bei Betrieb der DHR-Anlage exakt dokumentiert werden, was an zwei Beispielen verdeutlicht werden soll. Der Durchfluß wird dabei an einem Punkt der Anlage mit einem magnetisch-induktiven Durchflußmesser, die Drücke werden mit Druckaufnehmern am Zulauf und am Ablauf des Aktivkohlefilters erfaßt, wobei letzterer sich am Hochpunkt der Anlage befindet, an welchem die maximalen Unterdrücke auftreten.

Abbildung 14 gibt die Durchfluß- und Druckverhältnisse bei Betrieb der Anlage sowohl im Pump- als auch im Heberbetrieb wieder. Wenn die Anlage über die Pumpe im Bypass gefüllt wird, ist dies an den auftretenden Überdrücken zu erkennen. Nach Füllen und Entlüften des Systems wird auf Heberbetrieb umgeschaltet: dort treten, je nach vorhandener Potentialdifferenz (Differenz der Wasserstände in den Behältern), Durchflüsse von mehreren 100 l/h auf bei Unterdrücken bis zu -0,5 bar am höchsten Punkt der Anlage. Aus der Differenz der beiden Drücke, vor Zulauf und nach Ablauf Aktivkohlefilter, kann man die Druckverluste im Aktivkohlefilter auf etwa 10 cm Wassersäule/m – entsprechend 0,01 bar/m – abschätzen.

Ein weiteres Beispiel der Meßdatenerfassung (**Abbildung 15**) bei laufendem Heberbetrieb zeigt, daß der Heber zwischenzeitlich abgeschaltet und wieder angefahren werden kann, ohne daß die Pumpe dazu zum Einsatz kommen muß.

Im Realfall variiert der Durchfluß in Heber-Reaktor-Anlagen entsprechend den Grundwasserspiegelschwankungen. Während einer Trockenperiode kann der Durchfluß im Extremfall auf Null absinken und der Heber zum Stillstand kommen. Steigt der

Grundwasserspiegel wieder an, kommt der Heber selbsttätig wieder in Gang.

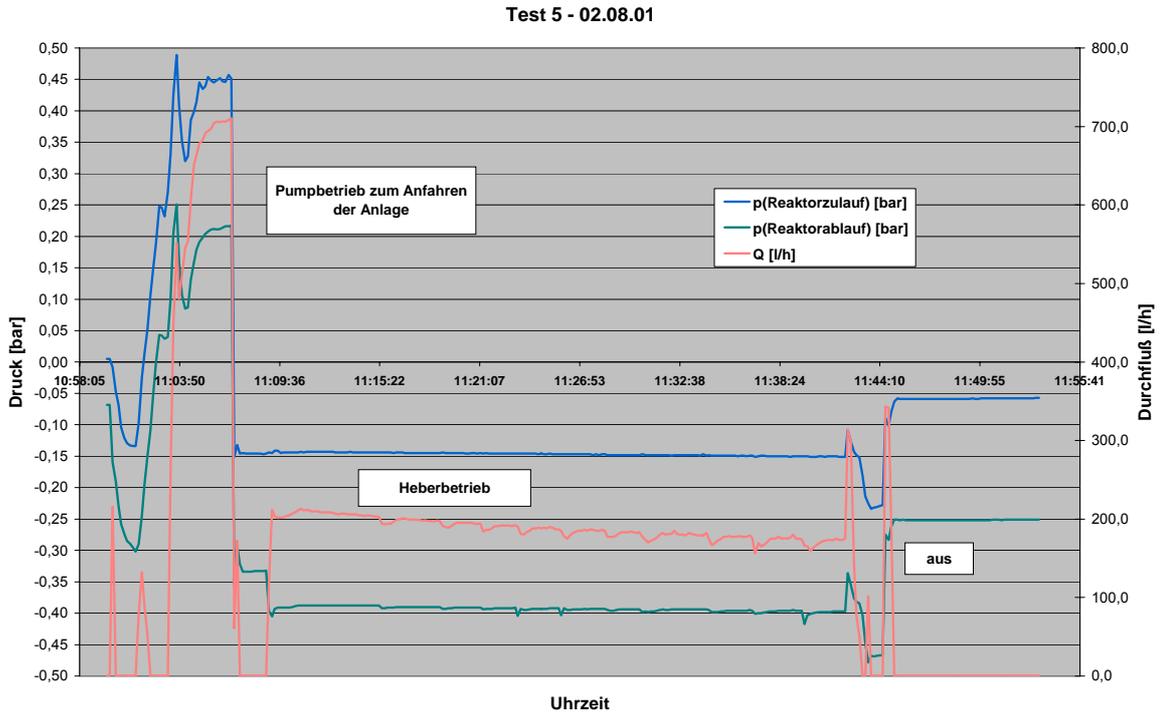


Abbildung 14: Automatische Meßdatenerfassung (Beispiel 1)

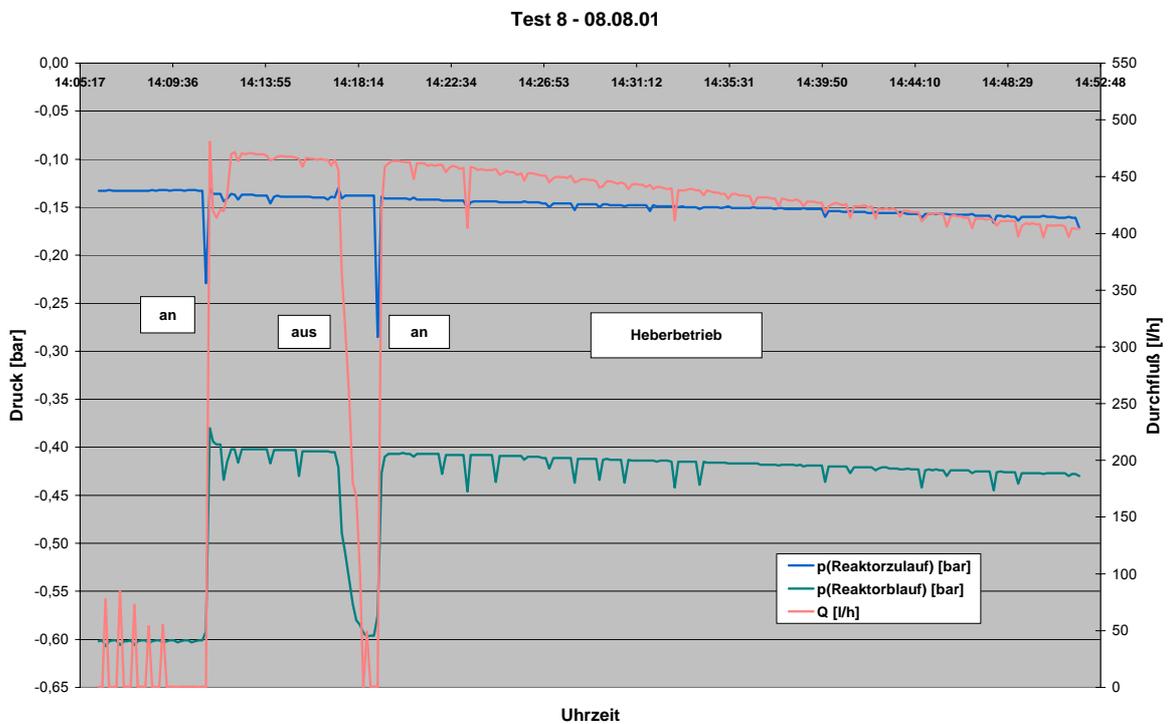


Abbildung 15: Automatische Meßdatenerfassung (Beispiel 2)

2.6 Eliminierung von Schadstoffen

Für die Grundwasserreinigung haben sich in den vergangenen Jahren einige Verfahren etabliert. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die für den jeweiligen Schadstoff bzw. die jeweilige Schadstoffgruppe einsetzbaren Verfahren sind dabei nach ihrer Häufigkeit bei Grundwassersanierungen geordnet.

Tabelle 1: Gängige Verfahren zur Grundwasserreinigung (verändert nach LFU 1995)

SCHADSTOFFE	REINIGUNGSVERFAHREN
BTEX LHKW	Luft-Strippen Aktivkohle-Adsorption Biologische Verfahren Chemische Oxidation
PAK SHKW Pestizide	Aktivkohle-Adsorption Chemische Oxidation Biologische Verfahren
Phenole	Aktivkohle-Adsorption Biologische Verfahren Chemische Oxidation
Mineralöl-Kohlenwasserstoffe	Aktivkohle-Adsorption Biologische Verfahren Luft-Strippen Chemische Oxidation Ölabscheidung, Skimmer (bei Ölphasen)
Metalle	Ionenaustausch Fällung Umkehrosmose
Cyanide	Chemische Oxidation Ionenaustausch Biologische Verfahren Umkehrosmose
Ammonium	Luft-Strippen Ionenaustausch Biologische Verfahren
Nitrat	Ionenaustausch Biologische Verfahren
Eisen, Mangan	Fällung mit anschließender Kies-/Sandfiltration Fällung mit nachfolgender Sedimentation Mikrobielle Enteisenung
Trübstoffe (Ton-, Sandpartikel)	Kies-/Sandfiltration Sedimentation

Die Aktivkohle-Adsorption ist bei gelösten organischen Substanzen unbegrenzt einsetzbar. Das Luft-Strippen ist nur für leichtflüchtige organische Schadstoffe geeignet; zudem ist hier eine Abluftreinigung notwendig.

Biologische Verfahren sind nur bis zu einem bestimmten Konzentrationsbereich einsetzbar. Bei manchen Schadstoffgruppen, für die biologische Verfahren angegeben sind, werden nur relativ niedrig molekulare, gering verzweigte Verbindungen vollständig abgebaut. Ansonsten bilden sich Metabolite. Bei den PAK beispielsweise ist eine vollständige Mineralisierung nur bis zum Pyren (4-Ring) möglich. Gegebenenfalls ist eine Zudosierung von Nährstoffen erforderlich.

Die Chemische Oxidation ist ebenfalls nur bis zu einem bestimmten Konzentrationsbereich einsetzbar. Bei nicht vollständiger Reaktion kann es hier zur Bildung von Teiloxi-dationsprodukten kommen.

Ausführlichere Informationen zu den Einsatzbereichen, typischen Reinigungsendwerten und verfahrenstechnisch wichtigen Parametern werden in diesem Rahmen nicht gegeben. Auf die entsprechende Fachliteratur sei verwiesen.

Für Heber-Reaktor-Anlagen, bei denen die Reaktoren im Unterdruck betrieben werden, sind nur geschlossene Reinigungseinheiten einsetzbar. Das Luft-Strippen scheidet daher für den Unterdruckbetrieb aus. Für die anderen Reinigungsverfahren gibt es bei geschlossener Ausführung keine Einschränkungen.

2.6.1 Sonderfall: Vinylchlorid

Über die bei der Masse der Schadensfälle auftretenden Schadstoffcocktails hinaus, sollte im Rahmen dieses Forschungsprojektes auch für den gelegentlich auftretenden Fall einer starken Vinylchlorid-Kontamination, wie z. B. beim Öl-Epple-Areal und beim Sekundär-schaden Fumy (siehe **Kapitel 3**), ein technisch machbares, kostengünstiges Verfahren zur Eliminierung dieses Schadstoffes entwickelt werden, welches auch unter den Bedingungen des DHR-Verfahrens (geschlossenes System, Unterdruck) eine sichere Dekontamination gewährleistet.

Das oft übliche Strippenverfahren zur Entfernung leichtflüchtiger Schadstoffe kommt, wie erwähnt, beim DHR-Verfahren nicht in Frage, da sonst die Heberfunktion nicht garantiert

wäre. Eine gleichfalls mögliche, technisch erprobte UV-Degradation würde den Energieeffekt, einen der wesentlichen Vorteile des DHR-Systems, zwar reduzieren, könnte sich jedoch fallspezifisch als die günstigste Möglichkeit erweisen.

Als praktikable, energiesparende und kostengünstige Möglichkeit sollte daher zunächst ein aerober, mikrobieller Abbau des Vinylchlorids untersucht werden. Wie die Erfahrung bei vielen biologischen Sanierungen gezeigt hat, verläuft der mikrobielle Abbau von Vinylchlorid unter aeroben Bedingungen effektiv und vollständig ab. Auch ein anaerober Abbau wird beobachtet, gestaltet sich jedoch sehr langsam und damit ineffektiv.

Der Abbauprozess des Vinylchlorids war im Rahmen des Forschungsprojektes für die Varianten

- ungesteuerter, vollständiger Abbau im Aktivkohlefilter und
- Stimulation durch nachgeschaltete Oxidationsstufen zum biologischen aeroben Abbau technisch und ökonomisch zu klären.

Die nötige Zudosierung eines Sauerstoffträgers, z. B. in Form einer Wasserstoffperoxid-Lösung, und evtl. einer Nährstofflösung kann einfach und ohne Energieaufwand über eine Kapillare erfolgen, wie bereits erfolgreich an der Versuchsanlage demonstriert werden konnte. Dazu wurde ein mit Wasser gefüllter Behälter über eine Kapillare mit der Heberleitung verbunden. Der Durchfluß wird über den Durchmesser und die Länge der Kapillare und den vorhandenen Unterdruck gesteuert. Bei einem Durchmesser von 0,25 mm und einem Druck von -0,45 bar ergab sich z. B. ein Durchfluß von 30 ml/h bzw. 0,72 l/d. Dies ist eine Größenordnung, wie sie für Bioreaktoren in der Praxis üblich ist.

Zum aeroben, mikrobiellen Abbau von Vinylchlorid wurden Batch- und Säulenversuche mit Standortwasser vom Öl-Epple-Areal (**siehe Kapitel 3**) durchgeführt. Dieses wurde zusätzlich mit Vinylchlorid (VC) angereichert, um Versuche mit verschiedenen Ausgangskonzentrationen durchführen zu können. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind nachfolgend zusammengefaßt:

- Ergebnisse aus Batch-Abbauversuchen erbrachten den Beweis dafür, daß sich auf dem Aktivkohlefilter der momentan am Sanierungsstandort eingesetzten P+T-Anlage eine zum Abbau des Vinylchlorids fähige Mikrobiologie angesiedelt hat. Die VC abbauenden Bakterien konnten durch Ultraschall von der Aktivkohle remobilisiert und erfolgreich für den wiederholten Abbau von Vinylchlorid eingesetzt werden.

- Selbst bei sehr hohen VC-Konzentrationen bis zu 15 mg/l – am Standort betragen sie im Durchschnitt 1-3 mg/l – konnte ein vollständiger Abbau des Vinylchlorids beobachtet werden. Generell wurde in allen durchgeführten Abbauversuchen das Vinylchlorid bis unter die Nachweisgrenze ($< 10 \mu\text{g/l}$) abgebaut. Dies läßt darauf schließen, daß auch im kontinuierlichen Betrieb, abhängig von der Verweilzeit des zu reinigenden Wassers und der Populationsdichte der VC-Abbauer, eine Eliminierung des Vinylchlorids bis unter die Nachweisgrenze realisierbar ist.

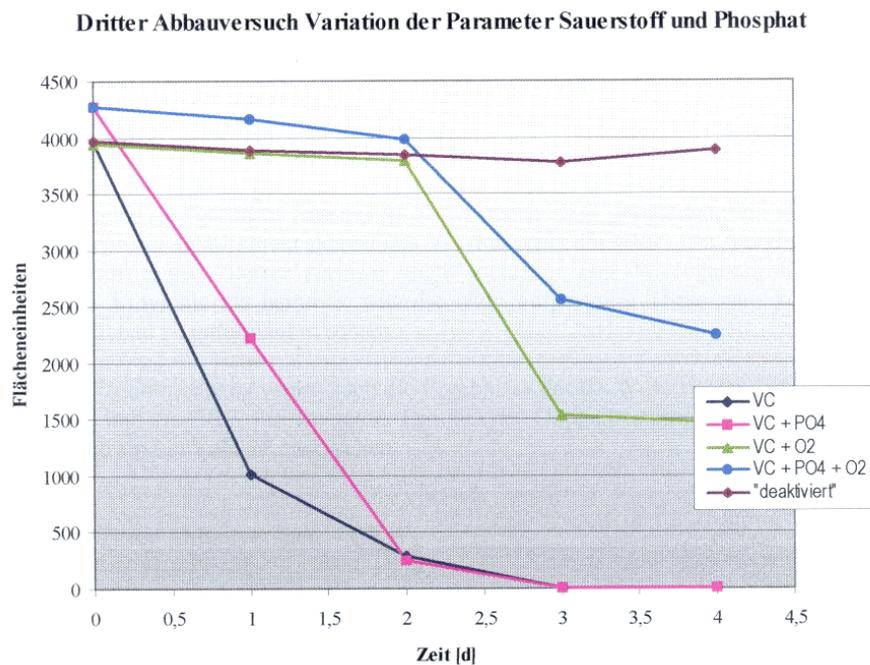


Abbildung 16: VC-Abbau unter Einfluß von Sauerstoff und Phosphat, Batchversuch (MAYER 2002)

[Anmerkung: Flächeneinheiten = Konzentrationsäquivalente]

- Im Hinblick auf die Abhängigkeit des VC-Abbaus von Nährstoffen erbrachten die Versuche, daß ein vollständiger Abbau des Vinylchlorids auch im phosphatarmen Standortwasser möglich ist. Der Abbau kann jedoch durch die Zugabe von Phosphat (ca. 5 mg/l) beschleunigt werden (**Abbildung 16**). Die am Sanierungsstandort im Grundwasser natürlich vorhandenen Nitratkonzentrationen (25-50 mg/l; Nitrat als Elektronenakzeptor) sind für einen vollständigen Abbau des Vinylchlorids ebenfalls ausreichend.
- Des weiteren wurde in Batch-Abbauversuchen ein vollständiger Abbau des Vinylchlorids auch ohne die Anreicherung von Sauerstoff beobachtet. Bei einem Sauer-

stoffgehalt von ca. 5,6 mg/l (durchschnittliche Konzentration am Standort) konnten ca. 900 µg/l VC vollständig abgebaut werden.

- Bezüglich der Abhängigkeit des VC-Abbaus von einem Cosubstrat lassen die bisherigen Ergebnisse darauf schließen, daß ein vollständiger Abbau des Vinylchlorids auch ohne bzw. bei nur vergleichsweise geringen Cosubstrat-Konzentrationen möglich ist.
- Bei den durchgeführten Versuchen konnte kein konkurrierender Abbau eines anderen Schadstoffes, wie z. B. cis-Dichlorethen oder Trichlorethen, beobachtet werden. Die bisherigen Beobachtungen deuten darauf hin, daß es sich bei den eingesetzten VC-Abbauern um Mikroorganismen handelt, die allein VC aber keine weiteren CKW abbauen können.

Dies bedeutet, daß auf dem Standort ein mikrobieller Abbau von VC mit autochthonen Mikroorganismen zu realisieren wäre.

Parallel zu den Abbauversuchen wurde die Sorption von im Wasser gelösten Vinylchlorid auf verschiedenen Aktivkohlen untersucht. Wie aus der Literatur (z. B. LFU 1995) und von Anwendungsfällen bekannt, ist die für eine Vielzahl organischer Kontaminanten geeignete Sorption auf Aktivkohle für Vinylchlorid vergleichsweise ineffektiv, da die Sorptionskapazitäten für VC bei konkurrierender Schadstoffsorption zu gering sind. Andere Untersuchungen (z. B. SOLOTUSCHIEN 1996) zeigen jedoch, daß für bestimmte Aktivkohlen, beispielsweise für solche mit basischen Oberflächen, durchaus ausreichende Beladungskapazitäten zu erreichen sind. Die Möglichkeit der adsorptiven Entfernung aus dem Grundwasser wird auch dadurch bestätigt, daß von verschiedenen Aktivkohleherstellern Adsorptionsisothermen für Vinylchlorid zur Dimensionierung von Aktivkohlefiltern zu beziehen sind.

Im Laufe des Jahres 2002 wurden verschiedene Batch- und Säulenversuche zur Adsorption von Vinylchlorid durchgeführt. In Batchversuchen wurden zunächst die Sorptionskapazitäten dreier verschiedener, herkömmlicher Wasseraktivkohlen untersucht (**Abbildung 17**). Die Sorptionskapazitäten (Beladungen) wiesen bei verschiedenen Restkonzentrationen vergleichbare Beladungen auf. Auf Grundlage der Batchversuche wurde eine der Aktivkohlen für die kontinuierlichen Säulenversuche ausgewählt.

Die Säulenversuche wurden zum Teil mit Standortwasser vom Öl-Epple-Areal durchgeführt. Falls dies nicht der Fall war, entsprachen die CKW-Ausgangskonzentrationen denen des Standortwassers. Hauptkontaminanten waren cis-Dichlorethen (cis-DCE) und VC im mg/l-Bereich. Weiterhin wurden Perchlorethen (PCE), Trichlorethen (TCE) und 1,1,1-Trichlorethan in Konzentrationen von mehreren 100 µg/l eingestellt. Zur Inhibierung eines möglichen mikrobiellen Abbaus, der eine Bewertung der Sorptionskapazität unmöglich gemacht hätte, wurden die Ausgangslösungen mit Natriumazid versetzt.

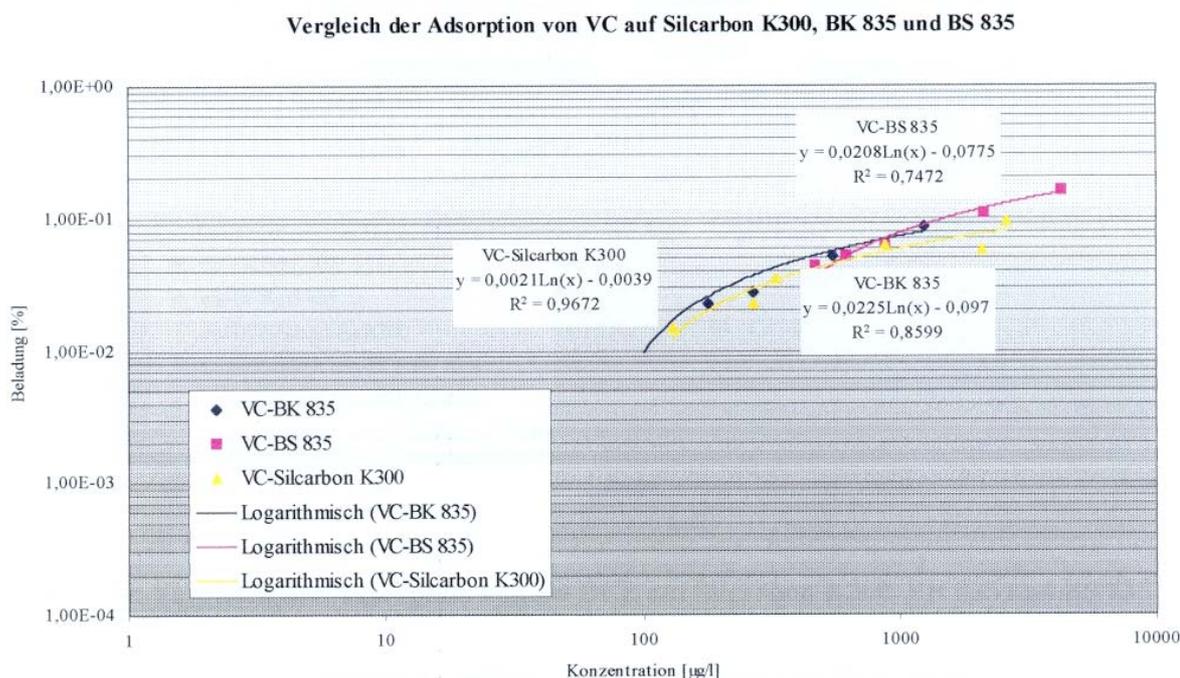


Abbildung 17: Vergleich der Adsorption von VC auf verschiedenen Aktivkohlen (MAYER 2002)

Die Ergebnisse haben gezeigt, daß Vinylchlorid auch bei konkurrierender Sorption im kontinuierlichen Betrieb bis unter die Nachweisgrenze aus dem Grundwasser entfernt werden kann. Es wurden CKW-Gesamtbeladungen von etwa 1 % erreicht, bis ein Durchbruch von Vinylchlorid festzustellen war. Dies ist eine Größenordnung, die generell der Dimensionierung von Aktivkohlefiltern zugrunde liegt. Somit stellt neben dem mikrobiellen Abbau auch die Adsorption eine geeignete Methode zur Eliminierung von VC aus dem Grundwasser dar.

2.6.2 Sonderfall: Chrom(VI)

Zur Eliminierung von Chrom(VI) kommen in der Wasseraufbereitung folgende Verfahren zum Einsatz:

- *Chemisches Verfahren*: Reduktion von Chrom (VI) zu Chrom(III) mit Sulfit, Eisen(II) oder Wasserstoffperoxid (H_2O_2) oder mittels Elektrolyse und anschließende hydroxidische Fällung, Entsorgung der hydroxidischen Schlämme als Sonderabfall (THOMANETZ 1998);
- *Chemisch-physikalisches Verfahren*: Reduktion zu Chrom(III) und anschließende Sorption auf einem Granulat auf anorganischer Basis², das zur Sorption von Metallen eingesetzt wird;
- *Physikalisches Verfahren*: Kationenaustausch mit Zeolithen (Aluminiumsilikate, ggf. mit modifizierten Oberflächen) als Austauschmaterial;
- *Biologisches Verfahren*: Verschiedene Bakterien (Pseudomonas, Alcaligenes, Enterobacter) reduzieren Chrom(VI) an Zelloberflächen, wobei Chrom(III)hydroxide ausfallen (FRITSCH 1998).

Chrom(VI)-belastetes Wasser des Standortes Fumy wurde in der P+T-Anlage auf dem Öl-Epple-Areal mit gereinigt (siehe **Kapitel 3.3**). Die P+T-Anlage bestand zur Entfernung organischer Schadstoffe aus einem Ölabscheider, zwei Flachstripp-Kolonnen, zwei Luft-Aktivkohlefiltern und einem Wasser-Aktivkohlefilter. Obwohl also keine spezielle Reinigungsstufe für Cr(VI) vorhanden war, wurde im Ablauf kein Cr(VI) mehr nachgewiesen.

Eine Ursache dafür könnte sein, daß Cr(VI) durch organische Verbindungen (C_{org}) zu Cr(III) reduziert wurde und sich dann als Hydroxid an der Oberfläche der Wasseraktivkohle angelagert hat. Diese Redoxreaktion wird vielfach in der Literatur erwähnt (z. B. KOCH 1995), ebenso die Tatsache, daß Chromate und Dichromate in sauren bis neutralen Lösungen stark oxidierend wirken (z. B. CHRISTEN 1988).

Eine weitere Ursache dafür könnte sein, daß sich auf der Wasseraktivkohle Bakterien angesiedelt haben, die in ihrem Stoffwechsel Cr(VI) als Elektronenakzeptor bei der Oxidation organischer Verbindungen (z. B. Vinylchlorid, **Kapitel 2.6**) verwenden.

² Ratio®Pur MF-S, Zusammensetzung: u. a. Mangan- und Siliciumdioxid, Hersteller: Bilfinger + Berger Umweltverfahrenstechnik GmbH, Mannheim

Bei Grundwässern, die sowohl durch organische Verbindungen als auch durch Chrom(VI) belastet sind, gilt es daher zu prüfen, ob eine separate Reinigungsstufe für Chrom(VI) erforderlich ist, oder ob eine Reduktion und Fällung im Wasseraktivkohlefilter zum Erreichen des Sanierungszielwertes ausreichend ist. Sollte das Grundwasser zusätzlich weitere Metalle enthalten, empfiehlt sich zusätzlich zur Aktivkohle-Adsorption ein Ionenaustausch als nachgeschaltete Reinigungsstufe.

Im folgenden **Kapitel 2.7** werden weitere Grundlagen zur Planung von DHR-Anlagen dargestellt.

2.7 Planung von DHR-Anlagen

2.7.1 Entscheidungshilfe: (D)HR oder Pump and Treat (P+T) bzw. Funnel and Gate (F+G)?

Bei einem vorliegenden Grundwasserschadensfall ist zunächst fallspezifisch zu entscheiden, ob das (Dichtwand-)Heber-Reaktor-Verfahren geeignet ist oder das Pump and Treat-Verfahren (P+T) bzw. das Funnel and Gate-System (F+G) die günstigere Alternative darstellt. Für die Alternative F+G kann im allgemeinen stets davon ausgegangen werden, daß bei den Fällen, in denen das DHR-Verfahren technisch möglich ist, dieses das kostengünstigere und betriebssicherere Verfahren darstellt. Die Entscheidung zwischen (D)HR und P+T kann entsprechend **Abbildung 18** erfolgen.

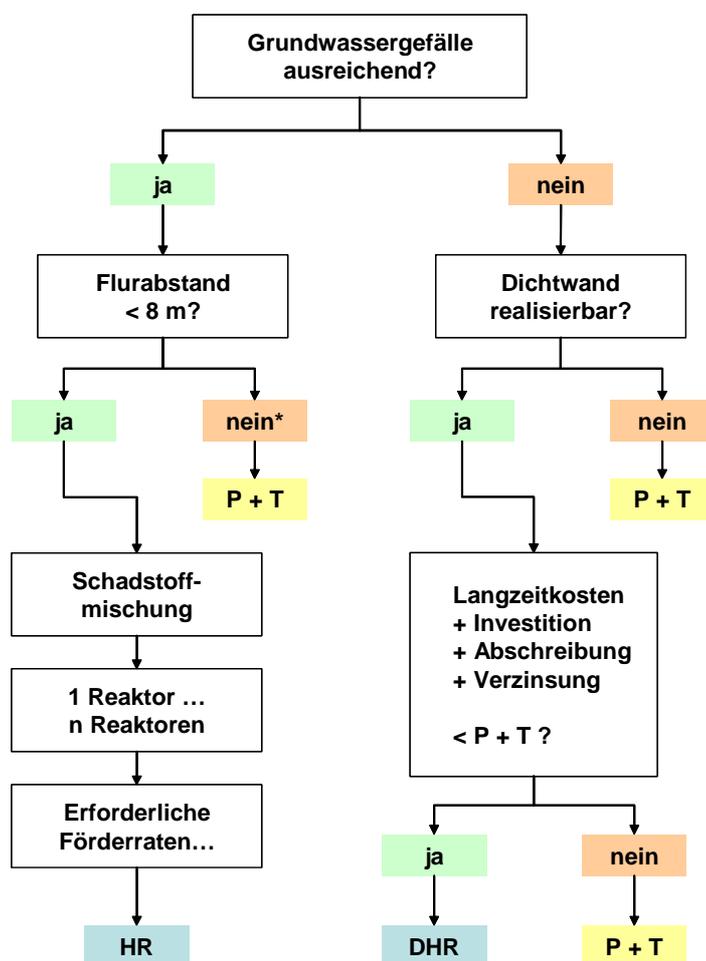


Abbildung 18: Entscheidungshilfe: P+T oder (D)HR

Die Prüfung der Anwendbarkeit des (Dichtwand-)Heber-Reaktor-Verfahrens erfolgt in den Schritten:

1. **Liegt ein ausreichendes Grundwassergefälle vor (mind. 0,5-1 %), oder kann das gereinigte Wasser in einen tiefer liegenden Vorfluter oder Kanal eingeleitet werden?**

Falls ja:

2. a) **Ist der Grundwasserflurabstand kleiner als 8 m?**

Falls ja: das Heber-Reaktor-Verfahren (HR) ist anwendbar. Entsprechend der vorliegenden Schadstoffe sind die erforderlichen Reinigungsstufen und Förderraten festzulegen und die Anlage entsprechend zu planen.

Falls nein: das Pump and Treat-Verfahren (P+T) stellt hier die geeignete Variante dar, es sein denn, die Reaktoren können kostengünstig Unterflur aufgestellt und so ein Flurabstand kleiner als 8 m erreicht werden.

Falls nein:

2. b) **Ist eine Dichtwand realisierbar?**

Falls ja: das Dichtwand-Heber-Reaktor-Verfahren (DHR) ist anwendbar, falls die Gesamtkosten nicht größer sind als für ein P+T-Verfahren.

Falls nein: das Pump and Treat-Verfahren (P+T) stellt hier die geeignete Variante dar.

2.7.2 Prinzipieller Aufbau einer (D)HR-Anlage

In **Abbildung 19** ist der prinzipielle Aufbau von (Dichtwand-)Heber-Reaktor-Anlagen dargestellt. Bei der Planung einer (D)HR-Anlage sind folgende Punkte zu beachten:

1. Die Potentialdifferenz, d. h. der Höhenunterschied zwischen Grundwasserentnahme und Einleitung sollte mindestens 2 m betragen. Der Durchfluß regelt sich je nach Grundwasserstand und Potentialdifferenz selbst ein. Je höher die Potentialdifferenz gewählt wird (was bei Reinfiltration in das Grundwasser zu längeren Ablaufleitungen führt), desto größer ist der Durchfluß durch die Anlage (siehe **Kapitel 2.7.3**). Falls erforderlich, kann man zur Drosselung des Durchflusses Absperrorgane wie z. B. Schieber in die Anlage integrieren.
2. Die Grundwasserentnahme kann wie beim P+T-Verfahren über herkömmliche Grundwasserbrunnen erfolgen. Diese sollten so angeordnet werden, daß die gesamte Abstromfahne erfaßt wird. Gegebenenfalls kann in jeden Brunnen, wie auch für P+T-

Verfahren üblich, eine Niveausteuering integriert werden, um eine maximal zulässige Absenkung zu definieren.

Alternativ kann das Grundwasser über eine Drainage und einen Sammelschacht gefaßt werden.

3. Zwar sind zur Förderung des Grundwassers keine Pumpen erforderlich, jedoch muß zu Beginn oder nach Wartungs- und Reparaturarbeiten das gesamte System über eine Pumpe im Bypass (P 1) mit Wasser gefüllt werden, bevor auf Heberbetrieb umgestellt wird.

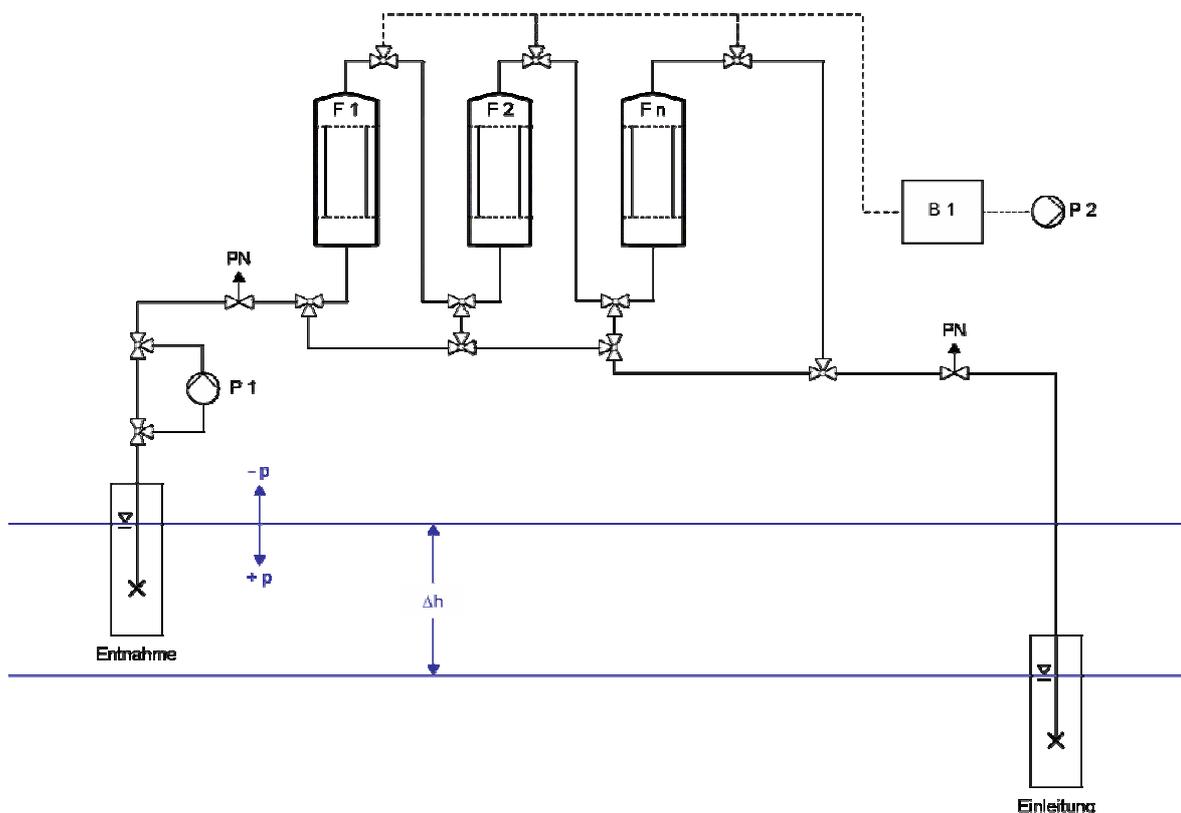


Abbildung 19: Prinzipieller Aufbau einer (D)HR-Anlage

4. Bei Betrieb der Reaktoren im Unterdruck müssen diese luftdicht geschlossen sein. Ebenso muß der gesamte Teil des Systems, der sich im Unterdruckbereich (-p) befindet, geschlossen, d. h. luftdicht sein; es ist darauf zu achten, daß bei Flanschen, Verschraubungen etc. die Dichtungen durchgängig auf glatten Oberflächen aufliegen. Als Material für Behälter und Rohrleitungen empfiehlt sich beispielsweise HDPE mit einem Verhältnis von Wandstärke zu Innendurchmesser von $> 10\%$.
5. An allen Hochpunkten der Anlage sind T-Stücke einzubauen. Von dort werden dann

für die automatische Entlüftung Leitungen zu einem zentralen Unterdruckbehälter (B 1) gelegt. Um einen definierten Unterdruck in diesem Behälter aufrechtzuerhalten, ist dieser mit einer Vakuumpumpe (P 2) über eine entsprechende Regelung verbunden. Zur automatischen Entlüftung siehe auch **Kapitel 2.5.2**.

6. Je nach Art und Menge der Schadstoffe sind die Reaktoren (F 1, F 2, ..., F n) zu wählen und zu dimensionieren. In den meisten Fällen treten bei Grundwasser-Schadstoffahnen organische Schadstoffe auf, die über Aktivkohlefilter (**Kapitel 2.7.4**) eliminiert werden können. Zusätzlich zu den benötigten Filtern ist ein sogenannter Polizeifilter in die Anlage zu integrieren. Vor und nach den Reaktoren sind Probenahmestellen zur Kontrolle des Reinigungserfolges vorzusehen.
7. Als Meß- und Kontrolleinrichtungen empfehlen sich Manometer (Druck) und Wasserzähler zur Ermittlung des durchschnittlichen Durchflusses durch die Anlage.

2.7.3 Rohrleitungsdimensionierung

Zur Dimensionierung eines Rohrleitungssystems sind einige Berechnungen erforderlich. Die wichtigsten sind:

1. die Berechnung des erforderlichen **Rohrinnendurchmessers**,
2. die Ermittlung der **Rohrleitungsverluste** und
3. die Überprüfung der **Rohrwanddicke** auf Festigkeit
(siehe Empfehlung in **Kapitel 2.7.2**).

Der **Rohrinnendurchmesser** bestimmt sich nach dem geforderten Volumenstrom (= Durchfluß). Der Volumenstrom Q [m³/s] ist das Produkt aus Geschwindigkeit v [m/s] und Fließquerschnitt A [m²]:

$$Q = v \cdot A$$

Bei Rohrleitungen und Reaktoren liegen meist kreisförmige Querschnitte vor, die sich nach folgender Formel berechnen:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2$$

mit d_i Innendurchmesser [m]

Bei Heberanlagen bestimmt sich der Durchfluß nach dem vorliegenden Gefälle $\Delta h/\Delta x$ [-]

und der Durchlässigkeit k [m/s] durch die Anlage:

$$Q = k \cdot \frac{\Delta h}{\Delta x} \cdot A$$

mit Δh Potentialdifferenz zwischen Grundwasserentnahme und Einleitung [m]

Δx Leitungslänge zwischen Grundwasserentnahme und Einleitung [m]

k Durchlässigkeit [m/s]

Die Durchlässigkeit durch die gesamte Anlage wird durch den am wenigsten durchlässigen Anlagenteil bestimmt. In den meisten Fällen wird dies ein Aktivkohlefilter oder ein anderer Reaktor sein. Die Durchlässigkeit von Aktivkohle liegt im Bereich von 0,01-0,05 m/s (WEINDL & KOCH 2001).

Die Kontinuitätsgleichung

$$Q_1 = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = Q_2$$

stellt z. B. eine Beziehung zwischen Durchfluß durch einen Aktivkohlefilter (1) und durch die Rohrleitung (2) dar.

Die Geschwindigkeit in der Rohrleitung sollte zur Minimierung der Rohrleitungsverluste (Druckverlust!) nicht zu hoch gewählt werden (siehe **Tabelle 2**).

Die **Rohrleitungsverluste** treten infolge von Reibung (Rohrinnenwand), Strömungswiderständen (Einbauten, Formstücke, Armaturen, ...) und innerer Reibung des Fluids auf. Dementsprechend setzen sie sich aus dem Rohrreibungsverlust Δp_R , den Einbauverlusten Δp_E und dem Höhenverlust Δp_H , der sich aus dem geodätischen Höhenverlust ergibt, zusammen (BÖSWIRTH 2000). Dieser Höhenverlust ergibt sich bei Heberanlagen aus der Potentialdifferenz zwischen Grundwasserentnahme und Einleitung.

$$\Delta p_R = \lambda \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad [\text{bar}] \quad \text{oder} \quad \Delta h_R = \lambda \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [\text{m}]$$

$$\Delta p_E = \sum_i \zeta_i \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad [\text{bar}] \quad \text{oder} \quad \Delta h_E = \sum_i \zeta_i \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [\text{m}]$$

$$\Delta p_H = \pm \rho \cdot g \cdot \Delta H \quad [\text{bar}] \quad \text{oder} \quad \pm \Delta H \quad [\text{m}]$$

- + für steigende Rohrleitungen
- für fallende Rohrleitungen

l Leitungslänge [m]

λ Rohrreibungszahl [-]

ζ_i Verlust-Kennzahlen für verschiedene Einbauten [-]

Teilt man die Druckverluste durch die Dichte ρ [kg/m³] und die Erdbeschleunigung g [9,81 m/s²] erhält man die entsprechenden Höhenverluste. Ein Druckverlust von 1 bar entspricht etwa einem Höhenverlust von 10 m.

Bestimmung der Rohrreibungszahl λ :

- Laminare Strömung mit $Re < 2300 \rightarrow \lambda = 64/Re$
- Turbulente Strömung mit $Re > 2300 \rightarrow \lambda/Re$ -Diagramm $\rightarrow \lambda$ wird in Abhängigkeit von Re und k/d_i abgelesen, wobei k die Rauigkeit des Materials ist. Die Rauigkeit verschiedener Materialien kann aus Tabellen entnommen werden. Für HDPE-Rohrleitungen beträgt die Rauigkeit $k = 0,0014$ m.

Die *Reynoldszahl* Re berechnet sich wie folgt:

$$Re = \frac{v \cdot d_i}{\nu}$$

mit ν dynamische Viskosität von Wasser ($1,3 \cdot 10^{-6}$ m²/s bei 10 °C)

Die Verlust-Kennzahlen ζ_i für die verschiedenen Einbauten (Armaturen, Krümmer, Abzweige, Einlauf, Auslauf, etc.) sind ebenfalls Tabellen zu entnehmen (BÖSWIRTH 2000).

In **Tabelle 2** sind Rohrreibungsverluste für verschiedene Durchflüsse und Durchmesser bei einer konstanten Leitungslänge von 750 m aufgeführt.

**Tabelle 2: Rohrreibungsverluste für verschiedene Durchflüsse und Durchmesser
(eigene Berechnungen)**

Durchmesser ³	Q = 1,5 l / s, l = 750 m		Q = 2 l / s, l = 750 m		
	DN 50	DN 70	DN 50	DN 70	DN 100
v [m/s]	0,76	0,39	1,02	0,52	0,25
Re [-]	29.382	20.987	39.177	27.983	19.588
d/k [-]	35.714	50.000	35.714	50.000	71429
λ [-]	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Δh_R [m]	4,9	0,9	8,7	1,6	0,27

Man erkennt deutlich, daß man durch die Wahl eines größeren Durchmessers die Rohrreibungsverluste minimieren kann. So führt beispielsweise eine Verdopplung des Durchmessers von DN 50 auf DN 100 bei einem Durchfluß von 2 l/s zu einer Reduzierung des Rohrreibungsverlustes um 8,4 m. Bei (D)HR-Anlagen sollten keinesfalls Unterdrücke von bis zu -1 bar ($\Delta h = 10$ m) auftreten, da sonst das Wasser verdampft.

Berechnungsbeispiel:

Gegeben:

Geforderter Durchfluß durch die Anlage	$Q = Q_1 = Q_2:$	1 l/s = 86,4 m ³ /d
Potentialdifferenz	Δh	3 m
Leitungslänge	$l = \Delta x$	150 m
Durchlässigkeit Aktivkohle	k	0,05 m/s

Berechnet:

Geschwindigkeit im Aktivkohlefilter	v_1	0,001 m/s = 3,6 m/h
Fließquerschnitt Aktivkohlefilter	A_2	1,00 m ²
Innendurchmesser Aktivkohlefilter	d_1	1,13 m

Gewählt:

Geschwindigkeit in der Rohrleitung	v_2	0,5 m/s
------------------------------------	-------	---------

Berechnet:

Fließquerschnitt Rohrleitung	A_2	0,2 dm ²
------------------------------	-------	---------------------

Innendurchmesser Rohrleitung	d_2	50 mm
Rohrreibungsverlust	Δh_R	0,84 m
Einbauverluste	Δh_E	$\zeta_i \cdot 0,013$ m
Verluste im Aktivkohlefilter	Δh_F	0,01 m pro m Filter
für 2 Aktivkohlefilter à 1,8 m Länge ergeben sich		0,036 m

Insgesamt kommt man bei diesem Berechnungsbeispiel auf 1 m Höhenverlust, was einem Druckverlust von 0,1 bar entspricht. Dadurch reduziert sich die verfügbare Potentialdifferenz von 3 m auf 2 m. Entsprechend reduziert sich der Durchfluß durch die Anlage um 1/3 auf 0,67 l/s. Um die Druckverluste zu minimieren, könnte ein größerer Innendurchmesser für die Rohrleitung gewählt werden.

³ Ein Durchmesser von DN 50 bedeutet z. B. 50 mm.

2.7.4 Dimensionierung von Aktivkohlefiltern

Für gelöste organische Verbindungen werden im Sanierungsbereich ganz überwiegend säulenförmige Festbett-Adsorber eingesetzt. Es handelt sich dabei im wesentlichen um zylindrische Behälter mit einer Aktivkohlefüllung. Sie werden häufig einfach Aktivkohlefilter genannt.

Die Arbeitsweise ist relativ einfach: das mit Schadstoffen belastete Fluid (Luft oder Wasser) strömt mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch eine Schicht aus Aktivkohle und gibt dabei die Schadstoffe an die Aktivkohle ab, d. h. die Schadstoffe sorbieren auf der Aktivkohle. Jede Konzentrationsabnahme im Fluid führt zu einem Beladungszuwachs auf der Aktivkohle. Es bildet sich ein Beladungsprofil in der Aktivkohleschüttung und ein korrespondierendes Konzentrationsprofil in der im Zwischenkornvolumen enthaltenen Lösung aus (ZIMMER & SONTHEIMER 1989).

Bei Aktivkohlefiltern zur Wasserreinigung sind generell Rückspülvorrichtungen vorhanden, um vor der Inbetriebnahme Kohlenstaub entfernen zu können. Beim Rückspülen mit hohem Volumenstrom dehnt sich das Kohlebett um bis zu 50 % aus. Im Behälter muß entsprechend Platz vorhanden sein. Durch entsprechend leitende Einrichtungen im Innern der Behälter muß gewährleistet werden, daß das Fluid nicht bevorzugt an der Behälterwandung entlang strömt (Problem der Randgängigkeit), sondern die Aktivkohle im vollen Querschnitt ausnutzt (ZIMMER & SONTHEIMER 1989).

Zu beachten ist, daß die Aktivkohle grundsätzlich nur dampfförmige bzw. gelöste Substanzen zurückhält. Eventuell vorhandene Staub- oder Schwebstoffe müssen vorher durch andere Filter abgetrennt werden, sonst würden sie die Aktivkohle verschmutzen.

Im folgenden werden die Grundlagen zur Dimensionierung von Wasser-Aktivkohlefiltern dargelegt. Zur Dimensionierung anderer Reaktoren wie Ölabscheider, Bioreaktoren oder Ionenaustauscher sei auf die Fachliteratur verwiesen.

Durchmesser:

Der Durchmesser eines Aktivkohlefilters (Festbett-Adsorbers) wird üblicherweise so gewählt, daß das Wasser eine Filtergeschwindigkeit von 5-20 m/h erreicht. Damit ist gewährleistet, daß die Verweilzeit des Wassers im Filter ausreichend ist, damit die

Schadstoffe durch die Makroporen zu den Mikroporen der Aktivkohle, die die eigentliche Sorptionsfläche bieten, diffundieren können (ZIMMER & SONTHEIMER 1989).

Höhe:

Die Höhe des Aktivkohlebettes im Adsorber sollte möglichst groß sein im Verhältnis zur Dicke der Adsorptionszone, damit die Kohle gut ausgenutzt werden kann. Die Betthöhen liegen in der Praxis zwischen 1 und 3 m. Durch Hintereinanderschalten von mehreren Filtereinheiten lassen sich höhere Betten simulieren (ZIMMER & SONTHEIMER 1989).

Standzeit:

Die Standzeit eines Aktivkohlefilters ist abhängig von der zugeführten Schadstofffracht und der Größe des Filters; je geringer die Schadstofffracht und je größer der Filter, desto länger ist die Standzeit. Wichtig bei der Planung der Reinigungsanlage ist die Kenntnis der Beladungskapazität der zu verwendenden Aktivkohle. Aktivkohlehersteller liefern Adsorptions-Isothermen für die betreffende Aktivkohle und die relevanten Schadstoffe; dort kann in Abhängigkeit von der Ausgangskonzentration (z. B. in µg/l) die Beladungskapazität (in Gew.-%) abgelesen werden.

Die Beladungskapazität ist v. a. abhängig von der Molekularstruktur, dem Molekulargewicht und der Polarität der Schadstoffe. So werden z. B. aromatische Verbindungen wesentlich besser sorbiert als aliphatische. Weiterhin orientieren sich unpolare funktionelle Gruppen an der Aktivkohleoberfläche, während die polaren zur Lösung hin orientiert sind. Mit abnehmendem Molekulargewicht steigt im allgemeinen die Adsorptionsfähigkeit, da große Moleküle nicht in die Mikroporen passen; gleichzeitig nimmt jedoch die Wasserlöslichkeit zu, was die Adsorptionsfähigkeit wiederum negativ beeinflusst. Im allgemeinen steigt die Beladungskapazität mit der Konzentration an (MENZEL & SCHÖLER 1998). Für CKW beispielsweise wird meist mit einer durchschnittlichen Gesamt-Beladungskapazität von 1 % gerechnet.

(1) Eingetragene Schadstoffmenge \dot{m}_s (= Schadstofffracht):

$$\dot{m}_s = c_s \cdot Q \quad [\text{kg}_s/\text{d}]$$

mit c_s Durchschnittliche Schadstoffkonzentration [$\text{mg}_s/\text{l} = 10^{-6} \text{ kg}_s/\text{l}$]
 Q Durchfluß [l/d]

(2) Standzeit t des Aktivkohlefilters bis zur vollständigen Beladung:

$$t = \frac{m_A \cdot y}{\dot{m}_S} \quad [\text{d}]$$

mit m_A Masse der Aktivkohle im Filter⁴ [kg_A]
 y Beladungskapazität [kg_S/kg_A]

Berechnungsbeispiel (Fortsetzung):

Berechnet (siehe oben):

Geschwindigkeit im Aktivkohlefilter v_1 0,001 m/s = 3,6 m/h

Gewählt:

Aufenthaltszeit im Aktivkohlefilter t_F 0,5 h

Berechnet:

Länge des Aktivkohlefilters l_F 1,8 m

Volumen des Aktivkohlefilters V_F 1,8 m³

Masse Aktivkohle m_A 900 kg_A

Annahme:

Schadstoffkonzentration (CKW) c_S 1 mg_S/l = 10⁻⁶ kg_S/l

Beladungskapazität Aktivkohle y 1 % = 0,01 kg_S/kg_A

Berechnet:

Schadstoffmenge \dot{m}_S 86,4 g_S/d = 0,0864 kg_S/d

Standzeit Aktivkohlefilter t 104 d

⁴ Die Schüttdichte von Aktivkohle in einem Festbett-Adsorber beträgt im Schnitt 0,5 kg/dm³.

Das Ende der Standzeit ist erreicht, sobald Schadstoffe im Ablauf des Aktivkohlefilters gemessen werden. Bei der Wasserreinigung ist es üblich, mindestens zwei Aktivkohlefilter intermittierend zu betreiben. Ist z. B. der erste Filter beladen, so kann auf den zweiten Filter umgestellt werden, während im ersten Filter die Aktivkohle ausgetauscht wird (und umgekehrt). Die beladene Aktivkohle kann durch Heißdampf oder Reaktivierung (Pyrolyse bei 400-800 °C) regeneriert werden.

3 DER STANDORT „ÖL-EPPLE“-AREAL

3.1 Situation

Seit Ende des 19. Jahrhunderts wurden am Standort ehemaliges Mineralölwerk Epple (**Abbildung 20**) die Herstellung und Verarbeitung sowie der Handel mit Mineralölen und mineralölverwandten Produkten betrieben. Ebenso wurden über Jahrzehnte hinweg Altöle aufbereitet. Bereits Ende der 60iger Jahre stellte man beim Bau bzw. in der Drainage des Nachbargebäudes massive Verunreinigungen im Grundwasserabstrom des Epple-Areals fest. Nach dem Konkurs des Unternehmens 1986 begann im Auftrag der Stadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, die systematische Altlastenerkundung des Geländes.

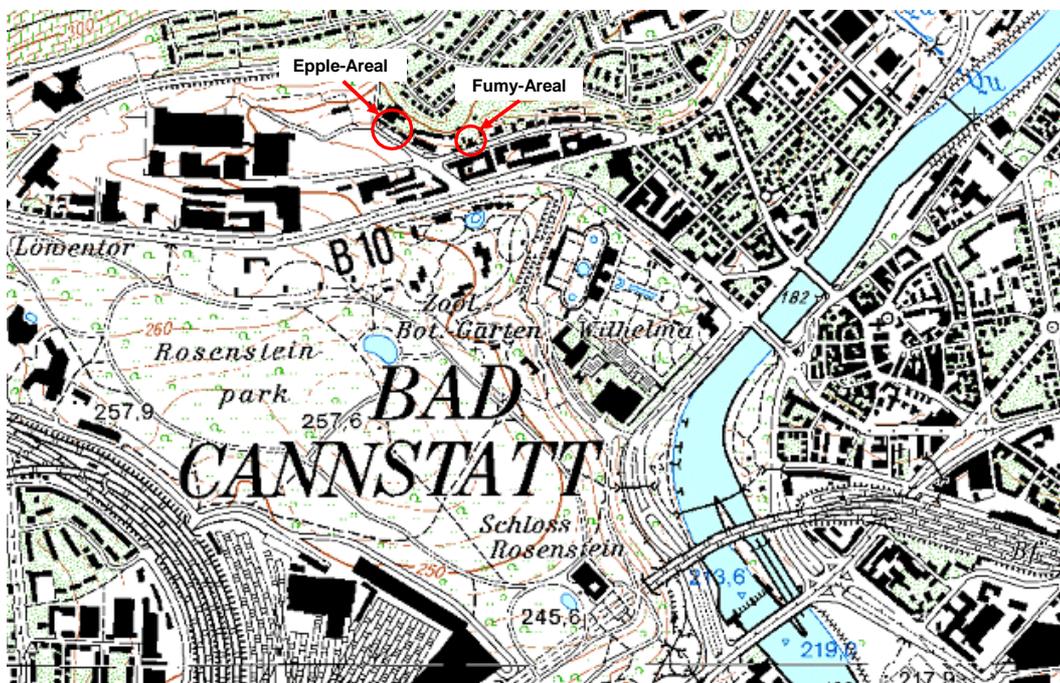


Abbildung 20: Lageplan Epple- und Fumy-Areal (Ausschnitt aus Topographischer Karte, Maßstab 1:25.000)

Die zeitgleich (1998) mit der näheren Erkundung begonnene und derzeit noch betriebene Grundwassersanierung erfolgt im Pump and Treat-Verfahren. Hierzu wird an fünf Sanierungsbrunnen Wasser entnommen und einer Reinigungsanlage zugeführt. Diese beinhaltet hintereinander geschaltet die Bauteile Ölabscheider, Stripkolonne im Umluftbetrieb und Wasseraktivkohlefilter. Nachdem das Grundstück jahrelang herrenlos war, wurde es im Jahre 2000 von der Firma Umweltschutz Nord mit der Verpflichtung zur Sanierung übernommen.

Durch die Kenntnis vom Heber-Reaktor-Verfahren wurden die Randbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz geprüft mit dem Ergebnis, daß am Standort Epple die Umsetzung der Methode in die Praxis auch ohne den Bau einer Dichtwand möglich ist. Die örtlichen Gegebenheiten wie Grundwasserflurabstand, Grundwassergefälle (siehe verfügbare Höhendifferenz, **Abbildung 21**) und Infrastruktur (Abwasserkanalanschluß) sind für den Einsatz des Verfahrens positiv.

3.2 Topographie, Geologie, Hydrogeologie und Schadstoffsituation

Der Altstandort liegt in der Hunklinge, einem Taleinschnitt im Gipskeuper, der vom Pragsattel in W-E-Richtung zur Neckartalaue zieht. Die Tallinie folgt ungefähr dem Verlauf einer Störungslinie (Höhenversatz 2-3 m, siehe Hydrogeologische Karte Stuttgart, AFU UND INGENIEURGESELLSCHAFT KUP 1998). Der Höhenunterschied vom Epple-Gelände zur Vorflut beträgt ca. 25 m (**Abbildung 21**) und ist vom Gefälle für die Heberfunktion mehr als ausreichend.

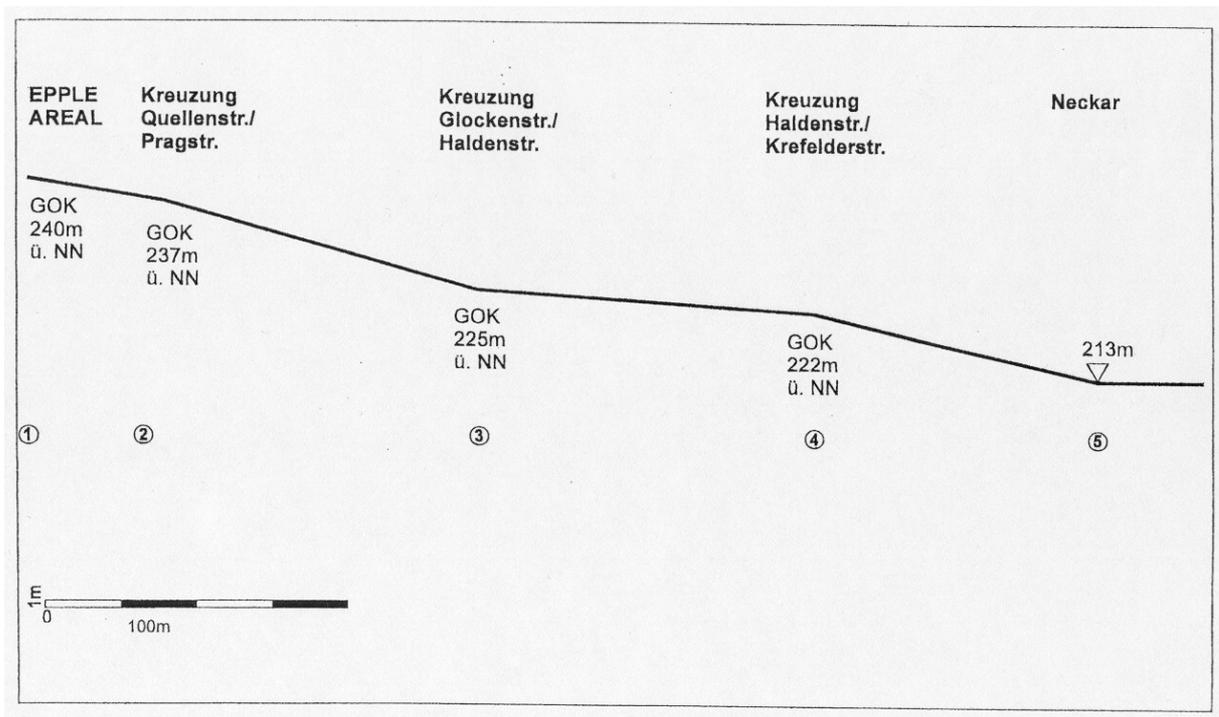


Abbildung 21: Höhenprofil Epple-Areal / Neckar

Im Bereich des Öl-Epple-Geländes liegt, wie in **Abbildung 22** schematisch dargestellt, folgender Schichtaufbau vor (mit Angabe der Spannweite der Mächtigkeiten):

- 1 - 4 m künstliche Auffüllung (A)
- 1 - 6 m Quartär (Q)
- 18 - 25 m Gipskeuper (km 1)
- 3 - 9 m Dunkelrote Mergel (DRM)
- 5,5 - 7 m Bochinger Horizont (BH)
- 8 - 10 m Grundgipsschichten (GG)
- ca. 20 m Lettenkeuper (ku)
- ca. 80 m Oberer Muschelkalk (mo)

Im Bereich des Schadensherdes liegt eine ausgeprägte hydraulische Stockwerksgliederung vor (**Abbildung 22**). Die einzelnen Grundwasserstockwerke

1. GW-Stockwerk: Quartär/Dunkelrote Mergel (Q/DRM)
2. GW-Stockwerk: Bochinger Horizont (BH)
3. GW-Stockwerk: Oberer Lettenkeuper (ku)

zeigen jeweils eigenständige Piezometerhöhen, die vom 1. zum 3. GW-Stockwerk abnehmen. Die drei oberen GW-Stockwerke sind gering ergiebig. In den vollständig ausgelaugten Grundgipsschichten und im Grenzdolomit sind keine Wasserzutritte feststellbar. Das 4. GW-Stockwerk Oberer Muschelkalk (mo) wurde nicht erkundet.

Die Grundwasserfließrichtung liegt für die drei oberen GW-Stockwerke im Bereich ESE bis SE (117°-130°). Das Grundwasser aus Quartär und Gipskeuper tritt nach ca. 300 m Fließstrecke in die Kiese der quartären Talfüllung des Neckars über.

Tabelle 3: Hydrogeologische Daten Epple-Areal

Grundwasserstockwerk	Wasserspiegel [m ü. NN]	Flurabstand [m]	Transmissivität [m ² /s]	Ergiebigkeit [l/s]
Grundstück Epple (abstromige Grundstücksgrenze), GOK ca. 240 m ü. NN				
Q/DRM	234	6	3,4 E-05	0,1
BH	233,5	6,5	1,7 E-05	0,08
ku	228	12	1,3 E-04	0,9
mo*	225	15	3,0 E-02	> 10

*Werte aus Hydrogeologischer Karte Stuttgart (AFU UND INGENIEURGESELLSCHAFT KUP 1998)

In der ungesättigten Zone finden sich erhebliche Bodenbelastungen, teilweise ist Mineralöl in Phase vorhanden. Die Kontamination des Grundwassers beschränkt sich auf das erste und zweite Grundwasserstockwerk, doch hat sich die Schadstofffahne mittlerweile weit über die Grundstücksgrenze hinaus ausgedehnt, wobei die räumliche Abgrenzung in **Abbildung 22** sehr idealisiert dargestellt ist. Der Schadensherd, das ehemalige Mineralölwerk Epple, befindet sich in der Quellenstraße 22-26 (**Abbildung 22**).

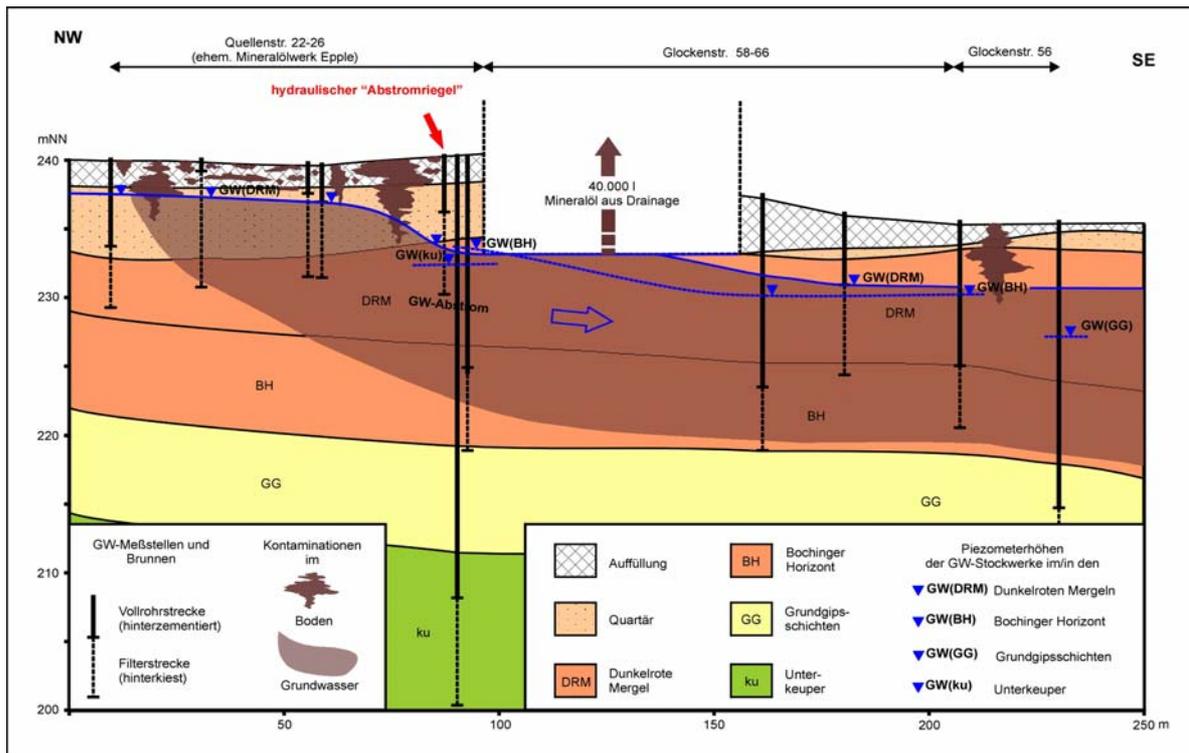


Abbildung 22: Längsschnitt durch das Untersuchungsgebiet (nach WOLFF 1999)

Im Grundwasser finden sich folgende Schadstoffe in gelöster Form:

- Mineralöl-Kohlenwasserstoffe (Gesamtkonzentration: mehrere 10 mg/l)
- Chlorierte Kohlenwasserstoffe (Gesamtkonzentration: mehrere mg/l)
- BTEX-Aromaten (Gesamtkonzentration: mehrere 100 µg/l)
- Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (Gesamtkonzentration: mehrere 10 µg/l)

Ein Sekundärschaden befindet sich im Abstrom des Epple-Areals in der Glockenstraße 56, das sog. Fumy-Areal (**Abbildungen 20 und 22**). Im Grundwasser finden sich die gleichen Schadstoffe wie im Grundwasser des Epple-Areals; hinzu kommen Chrom(VI)-Belastungen.

Nach dem Rückbau der Gebäude im Jahre 2001 wurden auf dem Epple-Areal seit 2002 die Bodensanierung durch Aushub und Off-site Behandlung (je nach Belastung thermisch bzw. mikrobiologisch) durchgeführt und der Standort für eine Neubebauung baureif gemacht. Die **Abbildungen 23 bis 28** zeigen Stationen der Baureifmachung.



Abbildung 23: Rückbau der Gebäude auf dem Epple-Areal (Januar 2001)



Abbildung 24: Rückbau der Gebäude und Abfallentsorgung auf dem Epple-Areal (Januar 2001)



Abbildung 25: Bodensanierung auf dem Epple-Areal (April 2002) (AFU 2002)



Abbildung 26: Ausmaß der Bodenkontamination auf dem Epple-Areal (Mai/Juni 2002) (AFU 2002)



Abbildung 27: Bodensanierung auf dem Epple-Areal (Juli 2002)



Abbildung 28: Bodensanierung und Wiederauffüllung auf dem Epple-Areal (September 2002)

Bei den Rückbau-, Sanierungs- und Wiederauffüllungsmaßnahmen kam es zu starken zeitlichen Verzögerungen. Außerdem wurden in Boden und Grundwasser zum Teil höhere Schadstoffgehalte angetroffen als auf Grundlage der Erkundungsmaßnahmen erwartet (siehe **Abbildung 26**).

Durch den Konkurs der Firma Umweltschutz Nord im September 2003 ging das Grundstück in die Hände einer Insolvenzverwaltung. Derzeit wird ein Käufer für das Grundstück gesucht. Eine Neubebauung wurde bis dato (Mai 2004) noch nicht begonnen.

Die Grundwassersanierung wird so lange fortgeführt werden, bis die vorgegebenen Sanierungszielwerte erreicht sind. In der vorhandenen Pump and Treat-Anlage wurde bisher außer dem Grundwasser des Epple-Areals auch das Grundwasser des Fumy-Areals gereinigt, welches dazu von der Glockenstraße 56 zum Epple-Areal hochgepumpt wurde. Im Laufe des Jahres 2004 soll für das Fumy-Gelände (siehe **Kapitel 5.1**) eine eigene Grundwassersanierungsanlage aufgebaut und in Betrieb genommen werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes war als Alternative zum bisher betriebenen Pump and Treat-Verfahren geplant, auf dem Epple-Areal das Heber-Reaktor-Verfahren zum Einsatz zu bringen. Die Anwendungsplanung dazu wird im folgenden **Kapitel 3.3** vorgestellt, ebenso in **Kapitel 5.1** die konkret vorgesehene Pilotstudie der Grundwassersanierung des Fumy-Areals.

3.3 Anwendungsplanung des DHR-Verfahrens für das „Öl-Epple“-Areal

Zur Umsetzung des DHR-Verfahrens am Standort wurden zwei Entnahmetechniken diskutiert. Die Entnahme könnte wie bisher so erfolgen, das kontaminierte Grundwasser abstromig des primären Schadensherdes (Werksgelände) über die vorhandenen oder die im Rahmen der Bodensanierungsmaßnahmen neu zu erstellenden Brunnen zu entnehmen und der DHR-Anlage zuzuführen. Alternativ könnte durch eine Drainagewand, die in den Grundwasserleiter – bis zur Schichtgrenze Dunkelrote Mergel / Bochinger Horizont – einzubringen wäre, der Grundwasserabstrom komplett entnommen werden (**Abbildung 29**).

Eine Drainagewand hat den Vorteil, den Grundwasserabstrom vollständig und sicher zu erfassen. Zudem ist die Entnahme über nur eine Leitung am tiefsten Punkt der Drainage (Brunnenschacht) möglich. Von Nachteil ist, daß eine Rückspülmöglichkeit für die Drainage vorzusehen ist, falls sich diese mit der Zeit mit Feinpartikeln zusetzt.

Die bisherige Entnahmetechnik mit Pumpen würde also dadurch ersetzt, mit Hilfe eines Saughebers, ohne Einsatz zusätzlicher Energie, das Grundwasser aus den Sanierungs-

Da das Grundwasser vom Fumy-Gelände zum Epple-Areal hochgepumpt (Überdruck), während das Grundwasser des Epple-Areals im Heberbetrieb gefördert würde (Unterdruck), wäre vor der Wasserreinigung ein Druckausgleich erforderlich (siehe Ausgleichsbehälter in **Abbildung 30**).

An den Hochpunkten der Anlage ist jeweils eine Möglichkeit zur Entlüftung vorzusehen, welche über einen zentralen Unterdruckbehälter gesteuert werden kann. Die Abluft ist über einen Luftaktivkohlefilter zu leiten und zu reinigen.

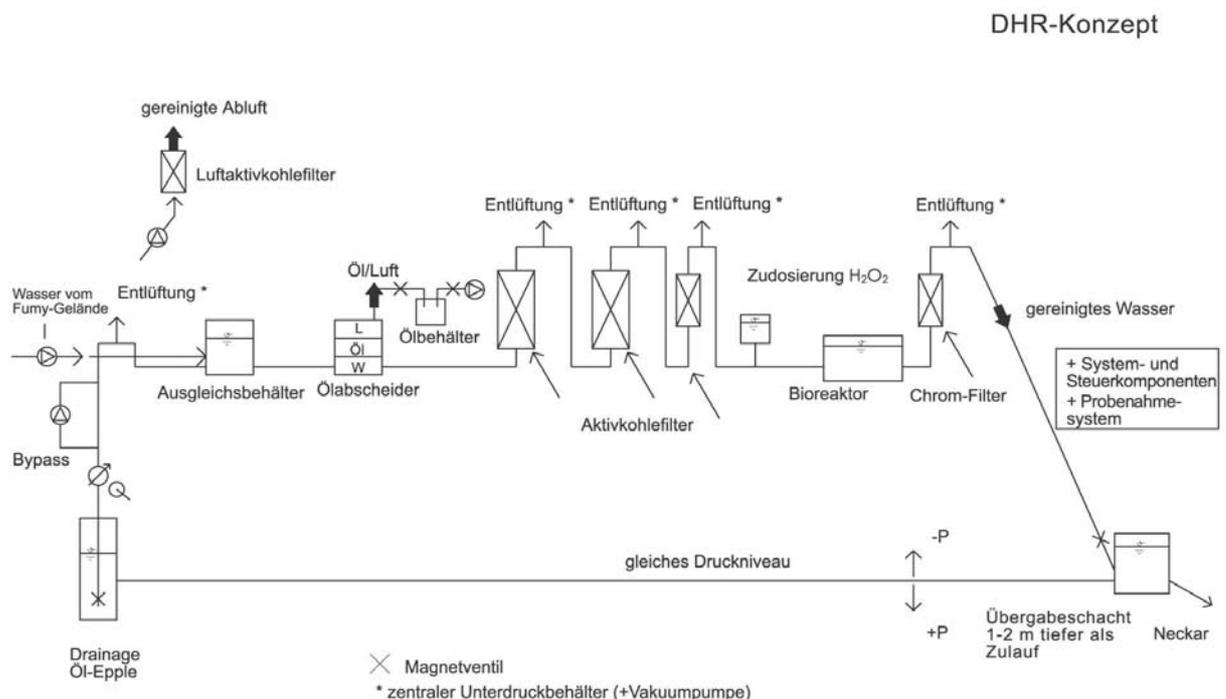


Abbildung 30: DHR-Anlagenschema (Epple-Areal)

Im vorliegenden Fall liegt der Ruhewasserspiegel im Grundwasser tiefer als der zur Ableitung vorgesehene Abwasserkanal in der Quellenstraße. Deshalb sollte in den Kanal eine Ablaufleitung eingebracht werden, die bis zur Vorflut reicht (Neckar). Dadurch würden nicht nur das zur Heberfunktion notwendige Gefälle erreicht sondern auch Kosten für das Einleiten des gereinigten Grundwassers in das Kanalnetz (Mischsystem) eingespart. Die Investitionen für den Einbau einer Ablaufleitung in das Kanalsystem würden sich also unabhängig von der Sanierungsvariante auf dem Epple-Areal durch die kostenfreie Direkteinleitung über die Betriebszeit der Sanierungsanlage schon bei einer Sanierungsdauer unter 10 Jahren amortisieren.

Innerhalb der Ablaufleitung war bei Wechsel des Druckniveaus von Unterdruck zu Überdruck ein Übergabeschacht vorgesehen (siehe **Abbildung 30**). Für den Heber könnte als Auslaufkonstruktion ein U-Rohr verwendet werden; das gereinigte Wasser würde dann über einen Überlauf (im Überdruck) zum Neckar weitergeleitet.

Für die Grundwassersanierung der beiden Standorte Epple und Fumy wurden im Laufe des Jahres 2002 verschiedene Varianten diskutiert und die Kosten für Investitionen und 10 Jahre Betriebszeit abgeschätzt. Diese Varianten sind in nachfolgender **Tabelle 4** dargestellt. Die Reihenfolge der Varianten definiert sich nach den Gesamtkosten, wobei *Variante 1* die kostengünstigste Alternative darstellt.

Die Varianten unterscheiden sich nach

1. *der Art der Förderung*

- Förderung nach dem Heberprinzip ohne Energieeintrag oder
- Förderung durch Pumpen mit Energieeintrag (hinzu kommen Wartungs- und Reparaturkosten für die Pumpen)

2. *dem Standort der Reaktoren*

- Überflur oder
- Unterflur

3. *dem Betrieb der Reaktoren*

- im Überdruck (Heberbetrieb Variante 1, grundsätzlich Pumpbetrieb) oder
- im Unterdruck (Heberbetrieb Varianten 2, 4, 7)

4. *der Zahl der Wasseraufbereitungsanlagen*

- eine Anlage zur gemeinsamen Aufbereitung des Grundwassers vom Epple- und Fumy-Areal (Varianten 1-3) oder
- zwei Anlagen zur getrennten Aufbereitung (Varianten 4-7)

5. *der Ableitung des gereinigten Grundwassers*

- kostenfreie Direkteinleitung (Neckar) oder
- kostenpflichtige Indirekteinleitung (Abwasserkanal)

Für jeden der fünf Aufzählungspunkte ist die jeweils kostengünstigere Option unterstrichen.

Tabelle 4: Varianten der Grundwassersanierung für die Standorte Öl-Epple und Fumy

Variante 1	Öl-Epple-Areal	Fumy-Areal
Förderung	Heberverfahren	
Behandlung	Grundwasserreinigungsanlage Überflur am Standort Glockenstraße 10	
Ableitung	Neckar	
Variante 2	Öl-Epple-Areal	Fumy-Areal
Förderung	Heberverfahren	Pumpen
Behandlung	Epple Unterflur	
Ableitung	Neckar	
Variante 3	Öl-Epple-Areal	Fumy-Areal
Förderung	Pumpen	
Behandlung	Epple Überflur	
Ableitung	Kanal	
Variante 4	Öl-Epple-Areal	Fumy-Areal
Förderung	Heberverfahren	Pumpen
Behandlung	Epple Unterflur	Fumy Überflur
Ableitung	Neckar	
Variante 5	Öl-Epple-Areal	Fumy-Areal
Förderung	Pumpen	
Behandlung	Epple Überflur	Fumy Überflur
Ableitung	Neckar	
Variante 6	Öl-Epple-Areal	Fumy-Areal
Förderung	Pumpen	
Behandlung	Epple Überflur	Fumy Überflur
Ableitung	Kanal	
Variante 7	Öl-Epple-Areal	Fumy-Areal
Förderung	Heberverfahren	Pumpen
Behandlung	Epple Unterflur	Fumy Überflur
Ableitung	Neckar	Kanal

Die *Variante 1* sieht vor, beide Standorte im Heber-Reaktor-Verfahren zu reinigen und das gereinigte Grundwasser direkt in den Neckar zu leiten. Dazu wurde ein Standort in der Glockenstraße 10 (**Abbildung 31**) gefunden, an dem sich die Möglichkeit bietet, die Reaktoren sowohl Überflur aufzustellen als auch im Überdruck zu betreiben. Damit wurde eine sehr kostengünstige Variante gefunden.



Abbildung 31: Standort Glockenstraße 10 im Abstrom des Epple-Areals (September 2002)

Bei der *Variante 2* würde die Grundwassersanierung auf dem Epple-Areal auf Heberbetrieb umgestellt. Das Grundwasser vom Fumy-Areal würde wie bisher zum Epple-Areal hochgepumpt, jedoch würde eine gemeinsame Aufbereitung beider Teilströme stattfinden. Diese Variante lag auch der vorgestellten Anwendungsplanung (siehe **Abbildung 27**) zugrunde.

Die momentan betriebene Pump and Treat-Anlage stellt hier die *Variante 3* dar. Der Vorteil dieser Variante ist, daß sie bereits installiert und seit mehreren Jahren in Betrieb ist.

Bei den Varianten, bei denen eine etwa 800 m lange Ablaufleitung zum Neckar in das Kanalsystem eingebaut würde (*Varianten 1, 2, 4, 5, 7*) wären Neuinvestitionen in Höhe von mindestens 300.000 € erforderlich. Von den Gesamtkosten stellt auch die *Variante 6*

– Investitionen für eine weitere Aufbereitungsanlage und laufende Kosten für die Indirekt-einleitung – eine relativ teure Variante dar.

Aufgrund fehlender Investitionsmittel hat sich die Stadt Stuttgart jedoch entschieden, die vorhandene Grundwasserreinigung nach dem Pump and Treat-Verfahren weiter zu betreiben, obwohl diese Variante (3) in der Gesamtkostenbetrachtung ab einer Sanierungsdauer von 5 Jahren nicht die günstigste ist. Durch diese Änderung der ursprünglichen Planung wird das Heber-Reaktor-Verfahren am Standort Öl-Epple zunächst nicht realisiert.

Bedingt durch den Konkurs des Standortbesitzers, die übermäßigen Verzögerungen bei der Baureifmachung und die finanziellen Umstände der Stadt Stuttgart, werden die ursprünglich für eine gemeinsame Grundwassersanierung vorgesehenen Standorte Öl-Epple und Fumy nun (ab 2004) getrennt saniert. Für das Fumy-Gelände wurde daher eine getrennte Anwendungsplanung durchgeführt (**Kapitel 5.1**). Die Pilot-Sanierung nach dem Heber-Reaktor-Verfahren ist für Mitte 2004 an einem der fünf Grundwasserbrunnen als Teilsanierung des Fumy-Geländes geplant. Bei erfolgreichem Pilotbetrieb wird das Heber-Reaktor-Verfahren bei der Ausschreibung der endgültigen Sanierungsanlage als Ausführungsvariante berücksichtigt werden.

Die Konsequenz für das BWPLUS-Forschungsprojekt war, daß die Praxistauglichkeit des DHR-Verfahrens möglichst frühzeitig an anderen Standorten zu demonstrieren war. Im folgenden wird der erste erfolgreiche Anwendungsfall beschrieben (**Kapitel 4**), ein Ausblick auf momentan in Planung befindliche Anwendungen gegeben (**Kapitel 5**) und schließlich eine Pilotstudie aus den USA zum Einsatz des Heber-Reaktor-Verfahrens vorgestellt (**Kapitel 6**).

4 ANWENDUNGSFALL CKW-KONTAMINATION IM KRAICHGAU

Bei diesem Standort handelt es sich um einen metallverarbeitenden mittelständischen Betrieb im westlichen Kraichgau mit einem CKW-Schaden im Untergrund. Die Sanierung erfolgte vormals im Pump and Treat-Verfahren in einer dreistufigen Strippanlage mit einem geschlossenen Luftkreislauf (**Abbildung 32**).

Nach mehreren Jahren Sanierungsbetriebszeit (Zeitraum 1993-2000) mit ca. 50 %



Stillstandszeit, bedingt durch Carbonatausfall und Verockerung, zeigte sich, daß die Anlage nicht nur durch die Investition sondern vor allem durch die Unterhaltung (Reparatur und Wartung) im Vergleich zur Sanierungseffizienz unverhältnismäßig hohe Kosten verursachte und den Betrieb erheblich belastete. Der Anteil der Energiekosten an den Betriebskosten belief sich dabei auf ca. 40 %. Ein Weiterbetrieb der Anlage war somit, auch vor dem Hintergrund, daß die CKW-Konzentration im abgepumpten Wasser mittlerweile von ca. 30.000 auf 3.000 µg/l gesunken war, nicht mehr wirtschaftlich.

Abbildung 32: Strippanlage (außer Betrieb, Juli 2001)

Durch die G.M.F. mbH, Karlsruhe, erfolgte im Juli 2001, mit Genehmigung des Landratsamtes Karlsruhe für einen Pilotbetrieb die erfolgreiche Installation und Inbetriebnahme eines Heber-Reaktors unter günstigen hydraulischen Bedingungen und einer Schadstoff-situation, die für den Einsatz des DHR-Verfahrens unproblematisch sind, d. h. Voruntersuchungen im halbtechnischen Maßstab waren hier nicht erforderlich.

Durch Kenntnis des Heber-Reaktor-Verfahrens ergab sich die Möglichkeit, die Sanierungsanlage nicht durch ein klassisches P+T-Verfahren sondern ohne größeren Aufwand durch ein passives Verfahren zu ersetzen. Am Standort liegt ein ausreichendes Gefälle für die Nutzung der Heberfunktion vor, d. h. der Bau einer Dichtwand war nicht erforderlich,

und der Grundwasserflurabstand beträgt weniger als 5 m. Außerdem konnten die vorhandenen Leitungen ohne wesentliche Änderungen übernommen werden.

Das Grundwasser wird über den bestehenden Sanierungsbrunnen erfaßt, im Unterdruck durch zwei Aktivkohlefilter gereinigt und dann wie beim Pump and Treat in einen Bach abgeleitet. Die durch VEGAS entwickelte Entlüftungseinrichtung wurde auch hier installiert, um gelegentlich auftretende Gasblasen zu entfernen und damit die Betriebssicherheit des Systems zu garantieren.

Der Betrieb des passiven Heber-Reaktors (**Abbildung 33**) verlief über bisher fast drei Jahre kontinuierlich und völlig störungsfrei, selbst bei Temperaturen von -10 bis -20 °C im Winter 2001/02. Nach einem Jahr Probetrieb (Juli 2001 bis Juni 2002) liegt seit Juni 2002 die schriftliche Genehmigung der zuständigen Fachbehörde zum Dauerbetrieb vor. Damit kann für zukünftige Anwendungen des Heber-Reaktor-Verfahrens bezüglich der Genehmigung auf diesen Musterfall zurückgegriffen werden.



Abbildung 33: Aktivkohlefilter – Entlüftung – Einleitung in Vorfluter

Im folgenden wird in einer tabellarischen Übersicht ein Vergleich zwischen dem ehemals betriebenen Pump and Treat-Verfahren und dem passiven Heber-Reaktor vorgenommen. In der nachstehenden **Tabelle 5** finden sich dazu Angaben zur Wasserrförderung sowie zu den Schadstoffmengen und -konzentrationen.

Tabelle 5: Verfahrensvergleich Pump and Treat und passiver Heber-Reaktor⁵

Verfahren	Pump and Treat	Passiver Heber-Reaktor		
		Zeitraum	Zeitraum	Zeitraum
Zeitraum	1993 – 2000	Juli 2001 bis Jan. 2002	Febr. 2002 bis Dez. 2002	Juli 2001 bis Dez. 2003
Mittlere Wasserförderung(*) [m³/h]	ca. 0,6 (intermittierend)	ca. 0,33 (0,15 – 0,65)	ca. 0,55 (0,19 – 0,72)	ca. 0,4 (0,15 – 0,75)
Insgesamt geförderte Wassermenge [m³]	ca. 25.000	1.675 ca. 240 / Monat	4.234 ca. 380 / Monat	7.180
Geförderte CKW-Menge [kg]	ca. 200	29	57	86
Durchschnittliche CKW-Menge pro Monat [kg]	ca. 3,33 (Beginn) –ca. 1,5 (bei Übergang auf DHR)	4,14	5,19	3,2
Anzahl Aktivkohlewechsel [-]	k. A.	2	3	5
CKW-Konzentrationen [mg/l]	Beginn: ca. 30 Bei Übergang auf DHR: ca. 3 (2 – 8 mg/l schwankend)	7,5 – 20	14 – 15	Beginn: ca. 7,5 Dez. 03: ca. 9,7 (0,5 – 15 mg/l schwankend)

Die mittlere Wasserförderung(*) beim passiven Heber-Reaktor ist abhängig vom Wasserdargebot im Entnahmehrungen bzw. von der Ergiebigkeit des Grundwasserleiters. Diese Selbstregelung des Hebersystems bedingt über die kontinuierliche Wasserentnahme eine deutliche Steigerung der Sanierungseffizienz (vgl. geförderte CKW-Menge / geförderte Wassermenge) und damit eine Verkürzung der Sanierungszeit, wird doch der Reinigungsanlage bei Pump and Treat durch den intermittierenden Pumpbetrieb mit teilweise hohen Entnahmeraten ein signifikanter Anteil an nicht kontaminiertem Grundwasser zugeführt.

⁵ Laut Angaben der G. M. F. GESELLSCHAFT für MESS- und FILTERTECHNIK mbH, Karlsruhe, vom 19.01.2004

Wie **Tabelle 5** auch zeigt, wurden in der Anfangsphase des DHR-Anlagenbetriebs wieder erheblich höhere Schadstoffkonzentrationen extrahiert, und auch die pro Monat entnommene Schadstoffmasse lag deutlich über der mittleren Menge bei der P+T-Anlage. Die DHR-Anlage extrahierte etwa die dreifache CKW-Menge gegenüber der durch die P+T-Anlage gegen Ende ihres Betriebes extrahierten Menge.

Es hat sich bei diesem Sanierungsfall gezeigt, daß das DHR-Verfahren vor allem bei günstigen hydrogeologischen Verhältnissen sowie bei relativ geringen Konzentrationen bzw. langen Sanierungszeiten eine kostengünstige und einfach zu realisierende Alternative zu Pump and Treat-Verfahren darstellt, und dies nicht nur bei neu zu installierenden Anlagen sondern auch beim Umbau bereits im Betrieb befindlicher Anlagen.

Ein direkter Kostenvergleich beider Verfahren kann hier nicht vorgenommen werden, da es sich um zwei verschiedene Aufbereitungsanlagen handelt. Beim Pump and Treat-Verfahren wurden die CKW aus dem Wasser ausgestrippt (im allgemeinen für kleine und mittlere CKW-Konzentrationen zu teuer) und die Abluft über Luft-Aktivkohlefilter gereinigt, während beim Heber-Reaktor-Verfahren Wasser-Aktivkohlefilter zum Einsatz kommen.

Um die breite Anwendbarkeit des DHR-Verfahrens zu dokumentieren, werden im folgenden **Kapitel 5** drei weitere Anwendungsplanungen vorgestellt.

5 AKTUELLE ANWENDUNGSPLANUNGEN

Der mögliche Einsatz des Heber-Reaktor-Verfahrens wird derzeit für drei laufende Grundwassersanierungen in Baden-Württemberg diskutiert. Die Standorte weisen jeweils Randbedingungen auf, die für den Einsatz des Heber-Reaktor-Verfahrens von Vorteil sind: ein ausreichendes Gefälle und ein Grundwasserflurabstand < 7 m. Auch hier kann jeweils auf den Bau einer Dichtwand verzichtet werden, und die Reaktoren können Überflur aufgestellt werden, was sich günstig auf die Gesamtkosten auswirkt. Die drei Standorte werden im folgenden kurz vorgestellt.

5.1 Firma Fumy, Stuttgart

Wie bereits in **Kapitel 3** diskutiert, befinden sich im Abstrom (ca. 200 m) des Epple-Areals, bedingt durch die Ausdehnung der Schadstofffahne, sogenannte Sekundärschäden. Einer dieser Sekundärschäden befindet sich am Standort der Schreinerei Fumy in der Glockenstraße 56 (**Abbildung 34**).



Abbildung 34: Der Standort Fumy (Stuttgart, Glockenstraße 56)

Im Grundwasser finden sich die gleichen Schadstoffe wie im Grundwasser des Epple-Areals. Auch hier ist Mineralöl in Phase vorhanden; hinzu kommen vornutzungsbedingte Chrom(VI)-Belastungen.

Das Grundwasser weist folgende Schadstoffkonzentrationen auf:

- Mineralöl-Kohlenwasserstoffe (Gesamtkonzentration: mehrere 10 mg/l)
- Chlorierte Kohlenwasserstoffe (Gesamtkonzentration: mehrere mg/l)
- BTEX-Aromaten, Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe und Chrom(VI) (Gesamtkonzentrationen: 10-100 µg/l)

Von 1999-2003 wurde das Grundwasser in der Pump and Treat-Anlage auf dem Epple-Areal mit gereinigt. Dazu wurde es von der Glockenstraße 56 zum Epple-Areal hochgepumpt. Ab Mitte dieses Jahres (2004) soll das geförderte kontaminierte Grundwasser in einer separaten Grundwassersanierungsanlage gereinigt werden (siehe **Kapitel 3.3**).

Auch hier liegen für das Heber-Reaktor-Verfahren geeignete Bedingungen vor:

- Der Flurabstand ist kleiner als 5 m, das Grundwasser- bzw. Abwasserleitungsgefälle größer als 1 %.
- Die vorhandenen Sanierungsbrunnen (mind. 5) können weiterbetrieben werden.
- Die Reaktoren können Überflur aufgestellt werden; möglich sind ein Unterdruckbetrieb am Standort selbst oder ein Überdruckbetrieb an einem tiefer liegenden Standort in der Glockenstraße (vgl. **Kapitel 3.3**).
- Das gereinigte Grundwasser kann in die Kanalisation eingeleitet werden. Bei einer sehr langen Betriebszeit könnte auch eine Leitung bis zum Neckar verlegt werden, was zwar kurzfristig hohe Investitionskosten verursacht; jedoch können langfristig die Kosten für die Indirekteinleitung eingespart werden (vgl. **Kapitel 3.3**).

Derzeit wird favorisiert, die Grundwasserreinigungsanlage am Standort selbst zu installieren. Als Reaktoren sind ein Ölabscheider und zwei Aktivkohlefilter vorzusehen (vgl. **Kapitel 3.3**). Um ein für die Heberfunktion ausreichendes Potentialgefälle zu erreichen, kann das gereinigte Grundwasser etwa 100 m vom Standort entfernt in die Kanalisation eingeleitet werden. Dazu ist eine Heberleitung in der Glockenstraße zu verlegen. Für den Pilotbetrieb im Sommer/Herbst 2004 kann dies oberirdisch erfolgen (keine Frostgefahr).

Im Vergleich zum Pump and Treat-Verfahren sind die Investitionskosten für das Heber-Reaktor-Verfahren etwas höher, da zusätzlich eine Leitung zu verlegen und eine automatische Entlüftung zu installieren sind. Neben der Kostenersparnis für teure Unterwasserpumpen sind jedoch die Betriebskosten für das Heber-Reaktor-Verfahren weitaus geringer: Es sind keine Pumpen zur Förderung des Grundwassers erforderlich sind, d. h. es findet kaum Energieverbrauch statt, und es fallen nur marginale Energiekosten (für die

Entlüftung) über lange Zeiträume an. Ebenso sind keine Wartung der Pumpen, keine Pumpenreparaturen und kein Pumpenersatz erforderlich. Außerdem ist die Ausfallsicherung aufgrund des extrem einfachen Prinzips sehr viel höher (vgl. **Kapitel 2.1**).

Die Stadt Stuttgart befürwortet die Umsetzung des Heber-Reaktor-Verfahrens für den Standort Fumy, auch vor dem Hintergrund, daß dies für das Epple-Areal aufgrund fehlender Investitionsmittel nicht möglich war (vgl. **Kapitel 3.3**). Außerdem hat die Stadt grundsätzlich ein Interesse an der Förderung innovativer Technologien geäußert.

Für Sommer 2004 ist der Testbetrieb mit der in der VEGAS-Versuchshalle aufgebauten halbtechnischen Anlage (Durchsatz ≤ 500 l/h) an einem der fünf Sanierungsbrunnen vorgesehen. Hierzu wird die Anlage in der Versuchshalle abgebaut und am Standort wieder installiert. Für den Testbetrieb kann die Leitung (DN 40) bis zur Einleitstelle in die Kanalisation oberirdisch verlegt werden. Der Pilotbetrieb (einschließlich Analytik) wird von VEGAS durchgeführt werden.

5.2 Ehemaliges Okal-Areal, Titisee-Neustadt

Bei dem zweiten Standort handelt es sich um das ehemalige Okal-Areal (**Abbildung 35**) in Titisee-Neustadt. Dort wurden über Jahrzehnte hinweg Hölzer veredelt und Leitungsmasten imprägniert. Hauptkontaminanten sind hier Arsen, Quecksilber und Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Das Grundstück wurde im Jahre 2000 von der Unternehmensgruppe Dr. Eisele mit der Verpflichtung zur Sanierung übernommen. Zu den Sanierungsmaßnahmen gehören: Gebäuderückbau, Entfernung des Schadensherdes (ehemalige Kyanisieranlage), Sicherung der ehemaligen Werksdeponie und Grundwasserreinigung.



Abbildung 35: Baureifmachung und Neubau auf dem Okal-Areal (Frühjahr 2003)

Das Grundwasser wird momentan über mehrere Sanierungsbrunnen gefördert und der Reinigungsanlage zugeführt. Diese besteht aus den Reinigungsstufen Kiesfilter, Sorptionsreaktor für Metalle, Aktivkohlefilter und Ionenaustauscher. Das gereinigte Grundwasser wird direkt in den Vorfluter eingeleitet. Die Grundwasserreinigung erfolgt zunächst im Pump and Treat-Verfahren und soll später auf Heberbetrieb umgestellt werden.

Um das für die Heberfunktion nötige Gefälle zu erreichen, bietet sich ein möglicher Standort der Grundwassersanierungsanlage auf dem Gelände des Sägewerks Ketterer (**Abbildung 36**). Dieser Standort hätte auch den Vorteil, daß die bereits vorhandenen Reaktoren weiterbetrieben werden könnten, da dort ein Betrieb im Überdruck möglich ist

und die bereits existierenden, großen und sehr teuren Reaktoren (> 50.000 €) nur für den Überdruckbetrieb bzw. sehr geringe Unterdrücke ausgelegt sind. Die Leitungslänge von der Grundwasserentnahme auf dem Okal-Areal bis zur Anlage würde ca. 400 m, die Leitungslänge von der Anlage bis zur Einleitung des gereinigten Grundwassers in den Vorfluter Gutach ca. 200 m betragen. Vor Umstellung auf Heberbetrieb sollen zunächst die Erfahrungen mit den komplexen und mehrstufigen Reaktoren, die Mitte 2003 in Betrieb gingen, abgewartet werden. Ein mögliches Hindernis für die Umstellung ist hier in fehlenden Investitionsmitteln zu sehen.

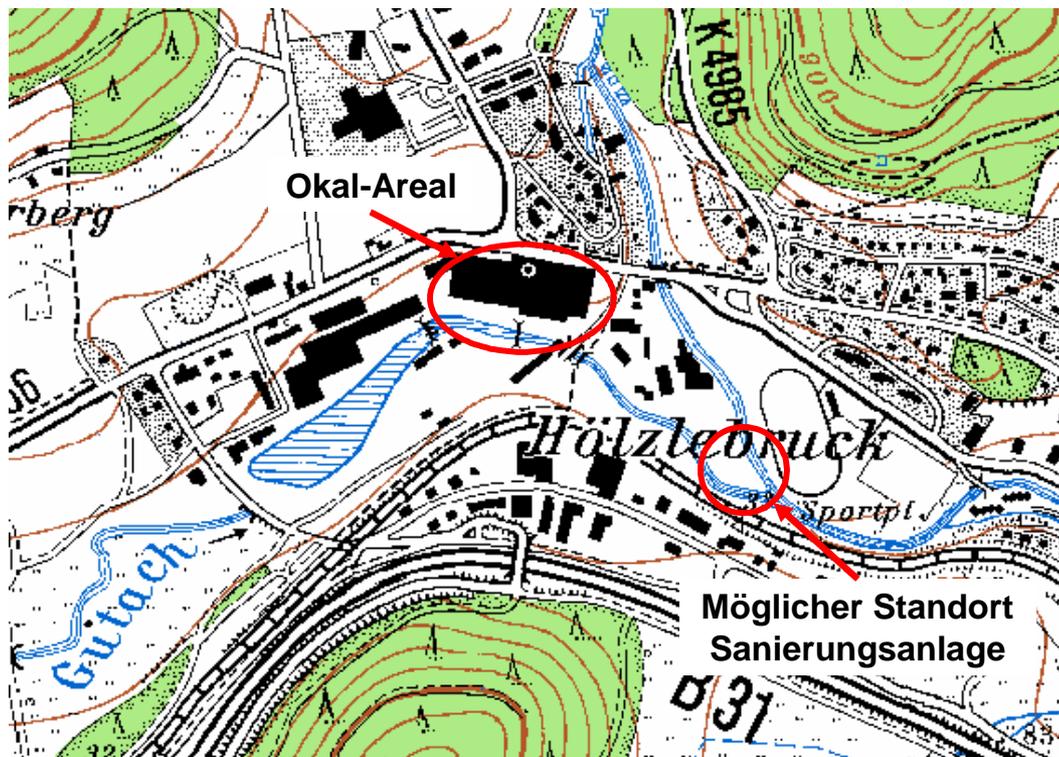


Abbildung 36: Lageplan Okal-Areal in Titisee-Neustadt (Ausschnitt aus Topographischer Karte, Maßstab 1 : 25.000)

5.3 CKW-Schaden in Heitersheim

Bei dem dritten Standort handelt es sich um einen aktiven Produktionsstandort, das Gelände einer Firma in Heitersheim (südlich von Freiburg). Dort werden seit Jahrzehnten Metalle ver- und bearbeitet, wobei durch die frühere Nutzung von CKW zum Entfetten eine Kontamination des Untergrundes hervorgerufen wurde. Der Schadensherd liegt im Bereich einer ehemaligen Sickergrube.

Seit Herbst 1998 erfolgt durch die Unternehmensgruppe Dr. Eisele eine Sanierung der Bodenluft und des Sickerwassers (Strippanlage, Luftaktivkohlefilter). Diese Anlage ist wegen ungeklärter Rechtsfragen seit Anfang 2003 außer Betrieb. Momentan wird auf Initiative der Gemeinde die räumliche Ausdehnung der Schadstoffahne über das Grundstück hinaus erkundet. Nach Abschluß der Erkundungsphase ist eine Modifizierung der Grundwasserreinigungsanlage vorgesehen.

Momentan ist in Planung, das CKW-belastete Sickerwasser aus dem schwebenden Grundwasserleiter (9-11,4 m u. GOK) im Heberbetrieb zu fördern, über Wasseraktivkohlefilter zu reinigen und das gereinigte Wasser in den darunter liegenden, nicht kontaminierten Grundwasserleiter (13-18,4 m u. GOK) einzuleiten. Für das Heber-Reaktor-Verfahren liegt mit $\Delta h = 4-7$ m ein ausreichendes Potentialgefälle vor. Da der Flurabstand jedoch größer als 8 m ist, muß die Reinigungsanlage Unterflur installiert werden. In den Entnahmenbrunnen ist jeweils eine Niveausteuerung vorzusehen, um bei Trockenfallen des schwebenden Grundwasserleiters die Heberleitung zu schließen.

Auch hier könnte also der Pump and Treat-Betrieb durch das energie- und wartungsarme Heber-Reaktor-Verfahren ersetzt werden. Das zuständige Landratsamt hat dazu bereits mündlich seine Zustimmung signalisiert. Die Fa. Eisele hat angeboten, eine Heber-Reaktor-Anlage zu installieren. Wegen derzeit noch nicht endgültig geklärter Rechtsfragen, die Sanierungspflichtigen betreffend, sind Art und Umfang der Sanierung noch nicht festgelegt. Deshalb können Detailplanung und Installation der Sanierungsanlage noch nicht erfolgen.

Grundsätzlich könnte auch an diesem Standort eine Anlage in der Größe der VEGAS-Versuchsanlage installiert werden.

6 GEO SIPHON™ GROUND WATER REMEDIATION SYSTEM – PILOTSTUDIE IN DEN USA

Das Heber-Reaktor-Verfahren ist ca. 2 Jahre nach der Patentanmeldung in Deutschland in ähnlicher Form auch in den USA unter dem Namen GeoSiphon™ bekannt geworden. Die erste Pilotstudie, die hier in Grundzügen vorgestellt wird, datiert aus dem Jahre 2002.

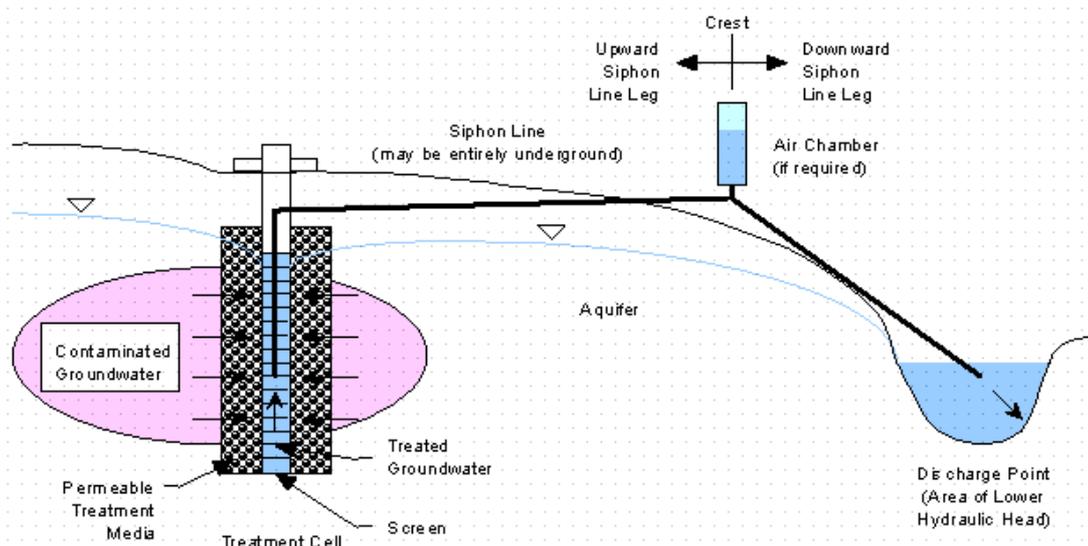


Abbildung 37: Pre-Siphon Treatment Cell GeoSiphon Configuration (PHIFER ET AL. 2002)

Das natürliche Grundwassergefälle wird zur Förderung des Grundwassers nach dem Heberprinzip ausgenutzt. Das Grundwasser wird entweder im Förderbrunnen selbst gereinigt (**Pre-Siphon Treatment Cell GeoSiphon Configuration, Abbildung 37**) oder in einem Reaktor (Filter) unmittelbar vor Einleitung in einen tiefer liegenden Vorfluter oder Aquifer (**Post-Siphon Treatment Cell GeoSiphon Configuration, Abbildung 38**).

Von der Westinghouse Savannah River Company in Aiken, South Carolina, wurden zwei GeoSiphon-Pilotanlagen auf dem Savannah River Site (SRS) betrieben. Dabei wurden unterschiedliche Reaktor- und Heber-Konfigurationen getestet und begleitend hydraulische Berechnungen durchgeführt, um Leitlinien für den Bau von Heber-Reaktor-Anlagen zu erhalten (PHIFER ET AL. 2002).

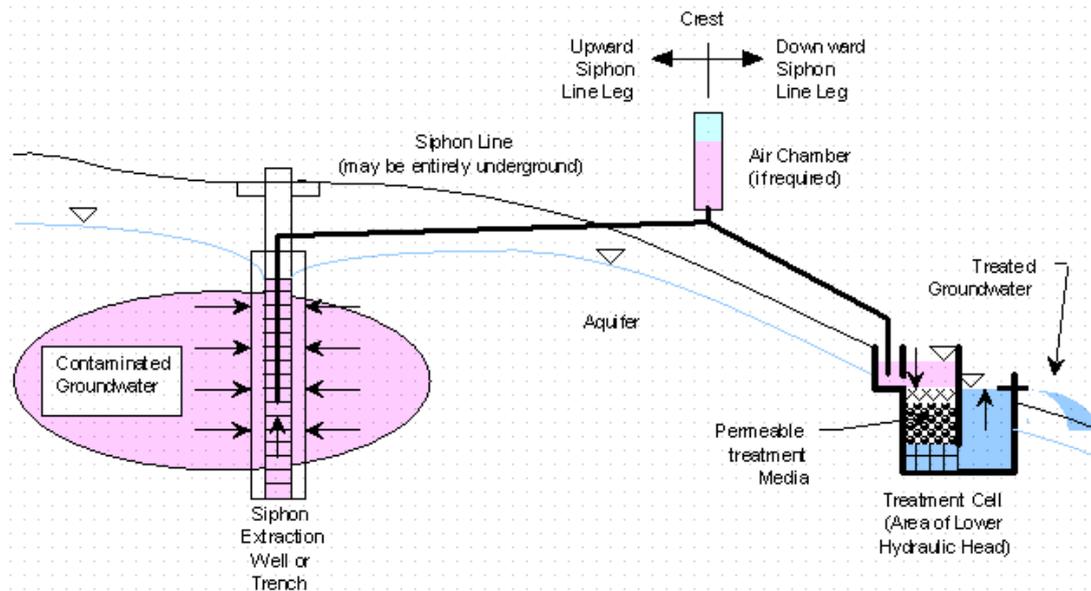


Abbildung 38: Post-Siphon Treatment Cell GeoSiphon Configuration
(PHIFER ET AL. 2002)

Als Filtermaterialien wurden Eisen zur reduktiven Dechlorierung von Trichlorethylen (TCE) und Kalk zur Ausfällung von Schwermetallen als Carbonate verwendet. Das gereinigte Grundwasser wurde in einen nahe gelegenen Vorfluter eingeleitet.

Die Heber-Reaktor-Anlagen wurden mit und ohne Entlüftungseinrichtung betrieben. Die Entlüftungseinrichtung bestand wie auch beim DHR-Verfahren aus einem am Hochpunkt der Anlage befindlichen Wasserbehälter, in den auftretende Gasblasen entweichen konnten, wodurch entsprechend Wasser in die Anlage nachströmte. Das Niveau in diesem Behälter wurde durch eine Vakuumpumpe über zwei elektrische Kontakte für minimalen und maximalen Wasserstand gesteuert (vgl. **Kapitel 2.5.1**).

Beim Betrieb ohne Entlüftungseinrichtung sollte eine minimale Fließgeschwindigkeit MFV (siehe Formel) nicht unterschritten werden, um Gasblasen aus der Heberleitung zu spülen. Bei dieser Betriebsweise kam es beim Pilotbetrieb jedoch fallweise, durch Abreißen der Wassersäule, zum Stillstand des Systems (PHIFER ET AL. 2002).

$$MFV = C \cdot \sqrt{g \cdot d_i}$$

MFV Minimale Fließgeschwindigkeit [m/s]

C Konstante: 0,31 bzw. 0,58

- g Erdbeschleunigung: 9,81 m/s²
 d_i Innendurchmesser [m]

Die spezifische Durchfluß q durch die Heber-Reaktor-Anlage kann mit Hilfe einer modifizierten Form der DUPUIT-Gleichung abgeschätzt werden:

$$q = f_p \cdot \frac{2\pi \cdot K_H \cdot b}{\ln \frac{R}{r}}$$

- q Spezifischer Durchfluß [m³/(s*m)]
 f_p Funktion, welche bei unvollkommenem Brunnen den Anteil der nicht verfilterten Aquifermächtigkeit berücksichtigt (KOZENY-Gleichung)
 K_H Horizontale Durchlässigkeit [m/s]
 b Aquifermächtigkeit [m]
 R Reichweite des Brunnens [m] (Berechnung z. B. nach der JACOB-Gleichung)
 r Brunnenradius oder Filterradius [m]

Je nach Potentialgefälle weicht der tatsächliche spezifische Durchfluß von dem berechneten ab. Im Rahmen der Pilotstudie lag das Verhältnis von gemessenem zu berechnetem spezifischem Durchfluß im Durchschnitt bei etwa 50 % (PHIFER ET AL. 2002).

Die wichtigsten Empfehlungen für den Bau von Heber-Reaktor-Anlagen, welche von PHIFER ET AL. (2002) aus den hydraulischen Berechnungen für die Betriebsweisen mit und ohne Entlüftung abgeleitet wurden, sind nachfolgend tabellarisch aufgeführt. Aus Gründen der Betriebsicherheit ist jedoch generell die Bauweise mit Entlüftung zu bevorzugen.

Auch die in den USA durchgeführten Pilotstudien zeigen deutlich die Vorteile und die Betriebssicherheit von Heberanlagen zur Sanierung kontaminierter Grundwässer.

Tabelle 6: Empfehlungen für den Bau von Heber-Reaktor-Anlagen nach PHIFER ET AL. 2002

Betriebsweise	Ohne Entlüftung	Mit Entlüftung
Leitung vor Anlagenhochpunkt	<ul style="list-style-type: none"> - Steigung > 1 % - Fließgeschwindigkeit unkritisch - Minimierung von Druckverlusten (z. B. großer Durchmesser) - Länge maximieren 	
Anlagenhochpunkt	<ul style="list-style-type: none"> - kritischer Punkt der Anlage - Wechsel zu kleinerem Leitungsdurchmesser - Fließgeschwindigkeit >> MFV 	<ul style="list-style-type: none"> - Wechsel zu größerem Leitungsdurchmesser
Leitung nach Anlagenhochpunkt	<ul style="list-style-type: none"> - Gefälle minimieren - Fließgeschwindigkeit >> MFV - Kleinerer Durchmesser als Leitung vor Anlagenhochpunkt (damit Luftblasen aus der Leitung gespült werden) - Länge minimieren 	<ul style="list-style-type: none"> - Gefälle maximieren - Fließgeschwindigkeit << MFV - Größerer Durchmesser als Leitung vor Anlagenhochpunkt (damit Luftblasen zum Anlagenhochpunkt gelangen, d. h. zur Entlüftung) - Länge minimieren
Allgemeine Empfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> - Der Potentialunterschied zwischen Fassung und Ableitung sollte unter Berücksichtigung des erforderlichen Durchsatzes [m³/h] und der Reibungsverluste ausreichend sein. - Innerhalb der Leitungen sollten möglichst wenige Diskontinuitäten (wie Krümmungen, Schieber, Verschraubungen, ...) sein. 	

7 FAZIT

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein innovatives Grundwassersanierungsverfahren, das sogenannte (Dichtwand-)Heber-Reaktor-Verfahren (kurz: DHR), durch großskalige Experimente im Labor und Technikum entwickelt und zur Marktreife geführt. Ein Kernstück des Projektes war der Bau und Betrieb einer Heber-Reaktor-Anlage im Realmaßstab in der VEGAS-Versuchshalle. Mit dieser Anlage wurden die Betriebssicherheit und Reinigungseffizienz bei verschiedenen Betriebszuständen und für spezielle Randbedingungen u. a. über eine automatische Meßdatenerfassung nachgewiesen und erforderliche Zusatzeinrichtungen wie z. B. eine automatische Entlüftung und eine automatische Zudosiereinrichtung für Hilfsstoffe entwickelt.

Mit einem Unterdruck-Aktivkohlefilter und einem Unterdruck-Ölabscheider wurden für den Sanierungsbereich erstmalig funktionsfähige Reaktoren im Unterdruck geschaffen. Speziell untersucht wurden außerdem Möglichkeiten zur Eliminierung von Vinylchlorid (Sorption oder Bioabbau) und Chrom(VI) (Reduktion und Fällung) aus schadstoffbelastetem Grundwasser.

Die Ergebnisse der Untersuchungen bilden die Basis für reale Sanierungsplanungen. Mit diesem Bericht (siehe **Kapitel 2.7**) werden konkrete Planungshilfen für den Bau und die Dimensionierung von (D)HR-Anlagen gegeben.

Im Kraichgau wird seit nunmehr fast drei Jahren ein CKW-Grundwasserschadensfall nach dem Heber-Reaktor-Verfahren ohne jegliche Probleme erfolgreich saniert. Mit diesem ersten Anwendungsfall, der vom Zuwendungsnehmer initiiert und wissenschaftlich begleitet wurde, konnte die Praxistauglichkeit des Verfahrens demonstriert werden.

Die Vorteile dieser Technologie liegen v. a. darin, daß bei Grundwasserschadensfällen mit zu erwartenden langen Sanierungszeiträumen die Investitionskosten (geringfügig), der Energiebedarf und auch die Wartungs- und damit die Gesamtkosten gegenüber anderen Verfahren wie z. B. dem Pump and Treat-Verfahren reduziert werden können, und daß die technische Anfälligkeit vermindert wird, ohne die Wirksamkeit für vorgegebene Reinigungs- und Sanierungsziele zu vermindern, bzw. teilweise sogar zu erhöhen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß sehr einfach, schnell und aussagesicher geprüft werden kann, ob das Verfahren für einen konkreten Schadensfall einsetzbar ist.

Für den Einsatz des Verfahrens an einem vom Schadstoffspektrum her schwierigen Standort wie dem „Öl-Epple“-Areal in Stuttgart wurde die Eignung nachgewiesen, und durch großskalige Experimente wurden die Planungsgrundlagen für einen funktionsfähigen Anlagenbetrieb geschaffen. Die Realisierung der DHR-Anlage kann leider nicht erfolgen, da der Stadt Stuttgart momentan keine Mittel für Neuinvestitionen auf dem Standort zur Verfügung stehen. Statt dessen ist die Realisierung des Verfahrens am Standort Fumy, der sich im Abstrom des Epple-Areals im Bereich der Sekundärkontamination befindet, vorgesehen. Ebenso sind eine effektive Fortführung der Grundwassersanierung im Kraichgau sowie die Implementierung an weiteren Standorten zu erwarten.

Mit dem (Dichtwand-)Heber-Reaktor-Verfahren steht der Praxis für eine ganze Reihe von Grundwasserschäden ein neues, innovatives Grundwassersanierungsverfahren, das sowohl kostenmäßig als auch bezüglich der verfahrensbedingten Umweltbelastungen erhebliche Vorteile gegenüber derzeit angewandten Sanierungsverfahren aufweist, zur Verfügung. Dieses Sanierungsverfahren gilt es, künftig als eine Option bei Sanierungsplanungen berücksichtigen.

Wir danken dem Land Baden-Württemberg für die Förderung des Projektes im Rahmen des Forschungsprogramms „BWPLUS – Baden-Württemberg Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (Förderkennziffer BWD 20005).

8 LITERATUR

- BARCZEWSKI, B. & MEMMINGER, B. (2002): Das Heber-Reaktor-Verfahren – eine innovative und kostengünstige Technologie zur Grundwassersanierung – dargestellt an Praxisbeispielen. – In: Tagungsband Boden und Altlasten Symposium 2002, Berlin.
- BLIEFERT, C. (1997): Umweltchemie (2. Auflage). - Wiley-VCH, Weinheim - New York - Chichester - Brisbane - Singapore - Toronto.
- BÖSWIRTH, L. (2000): Technische Strömungslehre. – Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig / Wiesbaden.
- CHRISTEN, H. R. (1988): Grundlagen der allgemeinen und anorganischen Chemie (9. Auflage). – Otto Salle Verlag GmbH & Co., Frankfurt am Main.
- FRANZIUS, V.; WOLF, K.; BRANDT, E. (HRSG.) (STAND: MAI 1995): Handbuch der Altlastensanierung. - R. v. Decker's Verlag, G. Schenck GmbH, Heidelberg; Economica Verlag GmbH, Bonn.
- FRITSCHKE, W. (1998): Umweltmikrobiologie: Grundlagen und Anwendungen. – Gustav Fischer, Jena - Stuttgart - Lübeck - Ulm.
- KIEFER, R., BARCZEWSKI, B. & MEMMINGER, B. (2001): Grundlagenuntersuchungen und Anwendungsplanung zum Einsatz des Heber-Reaktor-Verfahrens bei der Grundwassersanierung des Öl-Epple-Areals in Stuttgart. – In: Tagungsband zum VEGAS-Statuskolloquium 2001, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, VEGAS.
- KOCH, R. (1995): Umweltchemikalien (3. Auflage). – VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (HRSG.) (1997): Aktualisierung der Literaturstudie „Reaktive Wände“ pH-Redox-reaktive Wände. – Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung Band 33/97.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (HRSG.) (1996): Reaktive Wände – pH-Redox-reaktive Wände, Literaturstudie. – Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung Band 24/96.

- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (HRSG.) (1995): Grundwasserreinigung bei der Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen. – Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 17.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (HRSG.) (1995): Hydraulische und pneumatische in-situ Verfahren. – Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 16.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (HRSG.) (1994): Kompendium Stoffdatenblätter, Zusammenstellung spezifischer Kenndaten (phys.-chem. Daten, Toxizität, Umweltrelevanz, Richtwerte) zu altlastentypischen Substanzen. – Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung 14/94.
- MAYER, W. (2002): Untersuchung der Möglichkeiten und Entwicklung geeigneter Reaktoren zum aeroben, mikrobiellen Abbau von Vinylchlorid in geschlossenen Unterdrucksystemen. – Diplomarbeit am Institut für Wasserbau, VEGAS, Universität Stuttgart.
- MEMMINGER, B.; BARCZEWSKI, B. UND LUCKNER, L. (2003): Funnel & Gate-Systeme und ihre spezielle Gestaltung als DHR-Systemlösungen (Dichtwand-Heber-Reaktor). – In: Proceedings des DGFZ e. V., Heft Nr. 23, Selbstverlag, Dresden.
- MEMMINGER, B. & BARCZEWSKI, B. (2003): Pilotversuch zur energiesparenden, ökonomischen Reinigung kontaminierten Grundwassers im innerstädtischen Bereich mit einem Dichtwand-Heber-Reaktor am „Öl-Epple“-Areal in Stuttgart (BWD 20005), Forschungszwischenbericht zum BWPLUS-Statusseminar 2003.
- MEMMINGER, B. & BARCZEWSKI, B. (2002): Pilotversuch zur energiesparenden, ökonomischen Reinigung kontaminierten Grundwassers im innerstädtischen Bereich mit einem Dichtwand-Heber-Reaktor am „Öl-Epple“-Areal in Stuttgart (BWD 20005), Forschungszwischenbericht zum BWPLUS-Statusseminar 2002.
- MENZEL, U.; SCHÖLER, A. (1998): Vorlesungsmanuskript Industrielle Wassertechnologie. - Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart.
- PATENT NR. 19859862 „Dichtwand-Heber-Reaktor-Verfahren (DHR)“ der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS (Stuttgart) und des Grundwasserforschungsinstitutes Luckner & Partner (Dresden).

- PHIFER, M. A.; NICHOLS, R. L.; SAPPINGTON, F. C.; STEIMKE, J. L.; AND JONES, W. E. (2002): GeoSiphon™ Ground Water Remediation System Hydraulics, Report WRSC-MS-2002-00260 (<http://sti.srs.gov/fulltext/ms2002260/ms2002260.html>).
- SCHLEGEL, H. G. (1992): Allgemeine Mikrobiologie (7. Auflage). – Thieme Verlag, Stuttgart.
- SOLOTUSCHIEN, B. (1996): Untersuchungen zur Adsorption von Vinylchlorid. – Dissertation an der Universität Halle-Wittenberg.
- STARR, R. C. AND CHERRY, J. A. (1994): In Situ Remediation of Contaminated Ground Water: The Funnel-and-Gate System. – Ground Water, 32, No. 3, 465-476.
- SCHRENK, V. (2003): Ökologische Aspekte von Sanierungsmaßnahmen, insbesondere beim Flächenrecycling. – Technischer Bericht, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 10/2003. – Nr.: HG 18/2003, VEG 06.
- STUPP, H. D. (2001): Vergleich von LCKW-Grundwassersanierungen durch "Pump and Treat" und "Reaktive Systeme" – Verfahren und Kosten. – In: Handbuch der Altlastensanierung, Franzius – Wolf – Brandt 25. Erg.-Lfg., 06/2001.
- THOMANETZ, E. (1998): Unterlagen zur Vorlesung Sonderabfälle /Altlasten. – Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart.
- VOLLHARDT, K. P. C.; SHORE, N. E. (1995): Organische Chemie (2. Auflage). – VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim - New York - Basel - Cambridge - Tokyo.
- YAWS, C. L. (1999): Chemical Properties Handbook. – McGraw-Hill Handbooks, Inc. (New York etc.).
- ZIEREP, J. (1997): Grundzüge der Strömungslehre. – Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg
- WEINDL, J. & KOCH, M. (2001): Funnel-and-Gate – Chance für innerstädtisches Flächenrecycling. – www.stmugv.bayern.de/de/aktuell/download/boden/214.pdf.
- ZIMMER, G. & SONTHEIMER, H. (1989): Beschreibung der Adsorption von organischen Spurenstoffen in Aktivkohlefiltern. – Vom Wasser, 72, S. 1-19.