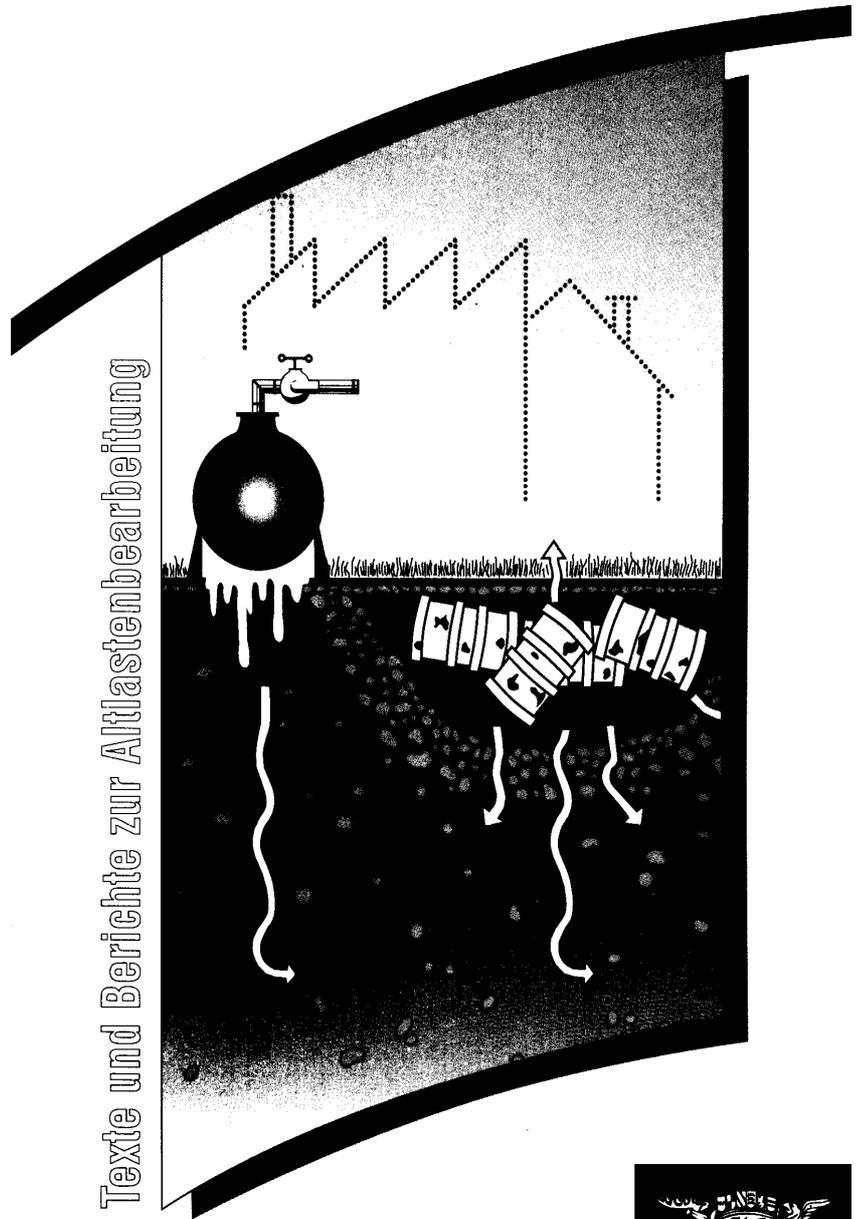


Zentraler Fachdienst Wasser - Boden - Abfall - Altlasten bei  
der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

**Handbuch Altlasten  
und Grundwasserschadensfälle**

# Der Grundwasser- Zirkulations-Brunnen (GZB)

Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung

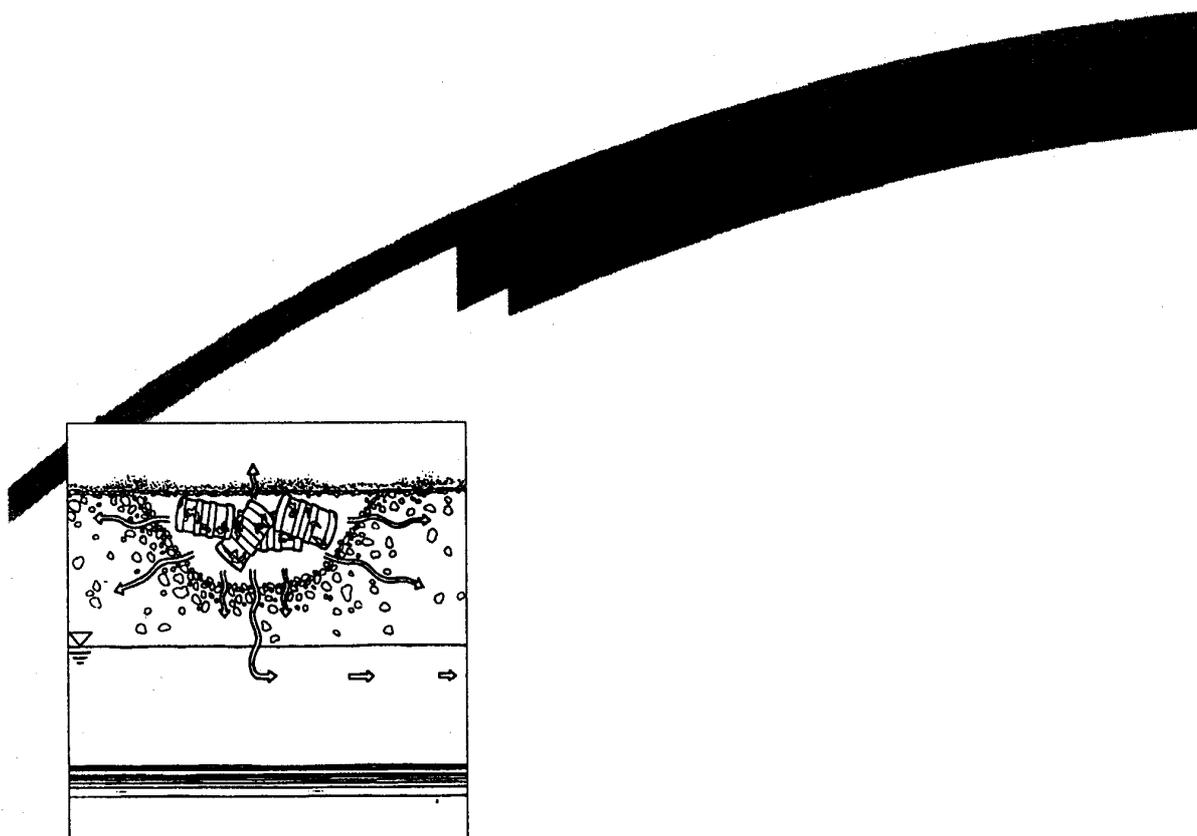


**BODEN  
ABFALL  
ALLASTEN**



**MINISTERIUM  
FÜR UMWELT  
UND VERKEHR**

# Der Grundwasser- Zirkulations-Brunnen (GZB)



Herausgegeben von der  
Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
1. Auflage

Karlsruhe 1993



Altlastenfachinformation im WWW

## **Impressum**

**Herausgeber:** Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
Griesbachstr. 1  
76185 Karlsruhe

**Redaktion:** Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg  
Abteilung Boden, Abfall, Altlasten  
Referat 54 – Altlastensanierung  
Dr. Wolfgang Kohler  
Axel Müller

**Verfasser:** Prof. Dr. Klaus Zipfel  
Lothar Kirschbauer  
TGU Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH  
Kurfürstenstr. 87a  
56068 Koblenz

Karlsruhe, August 1993

**Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. VERANLASSUNG - AUFTRAG .....</b>	<b>1</b>
<b>2. DARSTELLUNG DES GRUNDWASSER-ZIRKULATIONS-BRUNNENS UND SEINER VARIANTEN .....</b>	<b>3</b>
2.1 UVB-VERFAHREN DER FIRMA IEG, REUTLINGEN.....	4
2.2 ÜBERDRUCKSANIERUNGSBRUNNEN DER FIRMA SANTEC, BERLIN .....	5
2.3 HYDRO-AIRLIFT-BRUNNEN DER FIRMA ZÜBLIN, STUTTGART .....	7
2.4 GESAMTBETRACHTUNG DER VERFAHREN .....	8
2.5 VARIANTEN DES GZB-VERFAHRENS UND KOMBINATION MIT ANDEREN SANIERUNGSVERFAHREN .....	12
<b>3. DARSTELLUNG UND BEURTEILUNG VON ANWENDUNGSFÄLLEN DES GZB.....</b>	<b>15</b>
<b>4. MODELLMÄSSIGE UNTERSUCHUNG VON STANDARDFÄLLEN.....</b>	<b>23</b>
4.1 ALLGEMEINES.....	23
4.2 UNTERSUCHTE FÄLLE - HAUPTERGEBNISSE .....	24
4.3 WEITERGEHENDE AUSWERTUNGEN UND ÜBERLEGUNGEN .....	27
<b>5. EMPFEHLUNGEN FÜR DEN ANWENDER VON GRUNDWASSER-ZIRKULATIONS-BRUNNEN (GZB).....</b>	<b>30</b>
5.1 ERKUNDUNGSMAßNAHMEN .....	30
5.2 SANIERUNGSPLANUNG UND BEGLEITENDE UNTERSUCHUNGSMAßNAHMEN .....	32
<i>Grundwasserüberwachungssystem .....</i>	<i>33</i>
<i>Brunnen.....</i>	<i>37</i>
<i>Hydrochemische Überwachung .....</i>	<i>39</i>
5.3 ANWENDUNGSGRENZEN .....	40
<b>6. FOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....</b>	<b>42</b>
<b>7. VERWENDETE SCHRIFTEN .....</b>	<b>45</b>
<b>ANLAGE 1.....</b>	<b>48</b>
BLATT 1.....	48
BLATT 2.....	49
BLATT 3.....	50
BLATT 4.....	51
BLATT 5.....	52
BLATT 6.....	53
BLATT 7.....	54
BLATT 8.....	55
BLATT 9.....	56
BLATT 10.....	57
BLATT 11.....	58
BLATT 12.....	59
<b>ANLAGE 2: UNTERSUCHUNGEN MIT EINEM NUMERISCHEN MODELL.....</b>	<b>60</b>
1. MODELLAUFBAU - UNTERSUCHUNGSVARIANTEN .....	60
2. ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN.....	64
<b>ANLAGE 3: ZUSAMMENSTELLUNG VON MINDESTINFORMATIONEN ZUR ERKUNDUNG DES UNTERGRUNDES FÜR EINE GRUNDWASSERSANIERUNG (AUS /8/) .....</b>	<b>86</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>91</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>93</b>
<b>INDEXVERZEICHNIS.....</b>	<b>94</b>

## 1. Veranlassung - Auftrag

In den letzten Jahren wurde bei Grundwasserkontaminationen mit leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen (LHKW) in zahlreichen Fällen zur Sanierung der sogenannte Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB) eingesetzt. Da das Verfahren und seine prinzipielle Anwendung zumindest in wesentlichen Teilen von einem süddeutschen Unternehmen (IEG, Reutlingen) entwickelt wurde, dem hierzu auch Patente erteilt sind, lag ein Schwerpunkt seines Einsatzes zunächst auch im süddeutschen Raum, zumal besonders im schwäbischen Industrieraum um Stuttgart eine Reihe von LHKW-Verunreinigungen des Untergrundes und Grundwassers festgestellt worden waren. Zwischenzeitlich kam dieses Verfahren auch in anderen Bundesländern zur Anwendung.

Der Einsatz dieses Verfahrens erschien bei Sanierungsmaßnahmen vor allem am Verunreinigungsstandort schnell und relativ kostengünstig, wobei wegen nicht erforderlicher Grundwasserentnahme mit Beförderung an die Geländeoberfläche und anschließender Wiederversickerung auch keine umfangreiche Genehmigungsprozedur notwendig erschien. Infolgedessen wurden die für Sanierungsmaßnahmen zuständigen Verwaltungs- und Fachbehörden häufig vor vollendete Tatsachen hinsichtlich des Einsatzes und der Effektivität solcher Maßnahmen gestellt. Umfangreichere Vorkenntnisse oder technische Anleitungen standen nicht zur Verfügung und oft wurde aus Zeit- und Kostengründen auf eine ausreichend detaillierte Untersuchung und Darstellung der Bedingungen am Einsatzort verzichtet. Dementsprechend ergaben sich Probleme bei der Beurteilung einer ausreichenden Sanierung und im Vergleich zu bisher üblichen Maßnahmen. Außerdem herrschte Unsicherheit bei Anfragen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens, der technischen Dimensionierung und Ausführung sowie der dabei erzielbaren Reinigungswirkung bzw. eventueller Anwendungsgrenzen und nachteiliger Wirkungen.

Diese Situation führte zu erhöhten Aktivitäten von Seiten des zuständigen Ministeriums und der ihm zugehörigen Fachbehörde.

Der unterzeichnende Ingenieur wurde demgemäß infolge seiner langjährigen praktischen Tätigkeit und Erfahrungen im Bereich des Grundwassers und bei Grundwassersanierungen von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe, mit Werkvertrag vom 31.10.1991 zur Anfertigung einer "Beurteilenden Darstellung von Fakten und Hinweisen zum Einsatz des Grundwasser-Zirkulations-Brunnens (GZB)" beauftragt.

Die Bearbeitung sollte, ausgehend von einer Bestandsaufnahme und ersten Bewertung der bisher bei der Fachbehörde vorliegenden Informationen über das Verfahren und über praktische Anwendungsfälle sowie durch weitere Informationsbeschaffung bei Beteiligten und Anwendern, zunächst eine Übersicht über den derzeitigen Sachstand und Erfahrungen vermitteln. Darauf aufbauend sollten Vorschläge für ein weiteres Vorgehen und notwendige Kontrollmaßnahmen gemacht werden.

Zur Bearbeitung dieses Gutachtens wurden zahlreiche Gespräche und Reisen unternommen, um einen möglichst umfassenden Überblick über die Anwendung des GZB-Verfahrens zu

erhalten. Für ihre Gesprächsbereitschaft und die Überlassung von Fallunterlagen sei hier besonders folgenden Personen gedankt:

Herrn Alesi (BWU Kirchheim)  
Herrn Barczewski (Universität Stuttgart)  
Herrn Bernhardt (IEG Reutlingen)  
Herrn Brinnel (protec Oberursel)  
Herrn Bürmann (Universität Karlsruhe)  
Herrn Dittmar (ZÜBLIN Berlin)  
Herrn Herrling (Universität Karlsruhe)  
Herrn Hirschberger (HYDRODATA Oberursel)  
Herrn Högg (ZÜBLIN Stuttgart)  
Herrn Hötzl (Universität Karlsruhe)  
Herrn Nahold (Universität Karlsruhe)  
sowie verschiedenen Behördenvertretern.

## 2. Darstellung des Grundwasser-Zirkulations-Brunnens und seiner Varianten

Das Verfahren des Grundwasser-Zirkulations-Brunnens (GZB) stellt eine spezielle Anwendung der in Situ-Strippung dar, die innerhalb eines speziellen Brunnens über intensive Luftdurchmischung mit im Brunnen angesaugtem und wieder abgegebenem Grundwasser erfolgt. Durch den intensiven Luftdurchgang im Brunnen wird Wasser mit nach oben gerissen (Air-Lift-Effekt). Dies bewirkt eine Anhebung des Wassers innerhalb des Brunnens und damit einen Fließgradienten zum umgebenden Grundwasser hin. Somit tritt in der Regel im oberen Bereich Wasser aus dem Brunnen aus und im unteren Bereich fließt Wasser dem Brunnen zu. Bei dem Kontakt zwischen Luftblasen und Wasser findet außerdem eine intensive Ausgasung darin enthaltener leichtflüchtiger Bestandteile statt (in der Regel sind dies leichtflüchtige Chlor-Kohlenwasserstoffe). Die mit Schadstoff angereicherte Luft wird über einen Filter (z.B. Aktivkohle-Filter) geleitet und abgereinigt.

Da dieses Verfahren durch die Betriebsweise eine Zirkulation des Grundwassers im Umgebungsbereich des Brunnens erzeugt, wird im weiteren als übergeordnete und neutrale Bezeichnung der Begriff "Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB)" eingeführt, der auch bereits in der Literatur (/17/) verwendet wird.

Das oben beschriebene Verfahren der in Situ-Strippung mit Kreislaufführung des Grundwassers wird in Deutschland von verschiedenen Firmen angeboten, wobei die Bedingungen im Brunnen für die Erzeugung des Wasser-Luft-Gemisches und damit der detaillierte Ablauf des Reinigungsvorganges unterschiedlich sind. In alphabetischer Reihenfolge seien hier die maßgebenden Anbieterfirmen und die jeweilige Brunnenbezeichnung aufgeführt. Es sind dies die Firmen:

- IEG (Industrie-Engineering-GmbH, Reutlingen)
  - Unterdruck-Verdampfer-Brunnen (UVB)
- SANTEC GmbH (Ingenieurbüro für Sanierungstechnologie, Berlin)
  - Überdrucksanierungsbrunnen
- ZÜBLIN AG (Stuttgart)
  - Hydro-Airlift-Brunnen

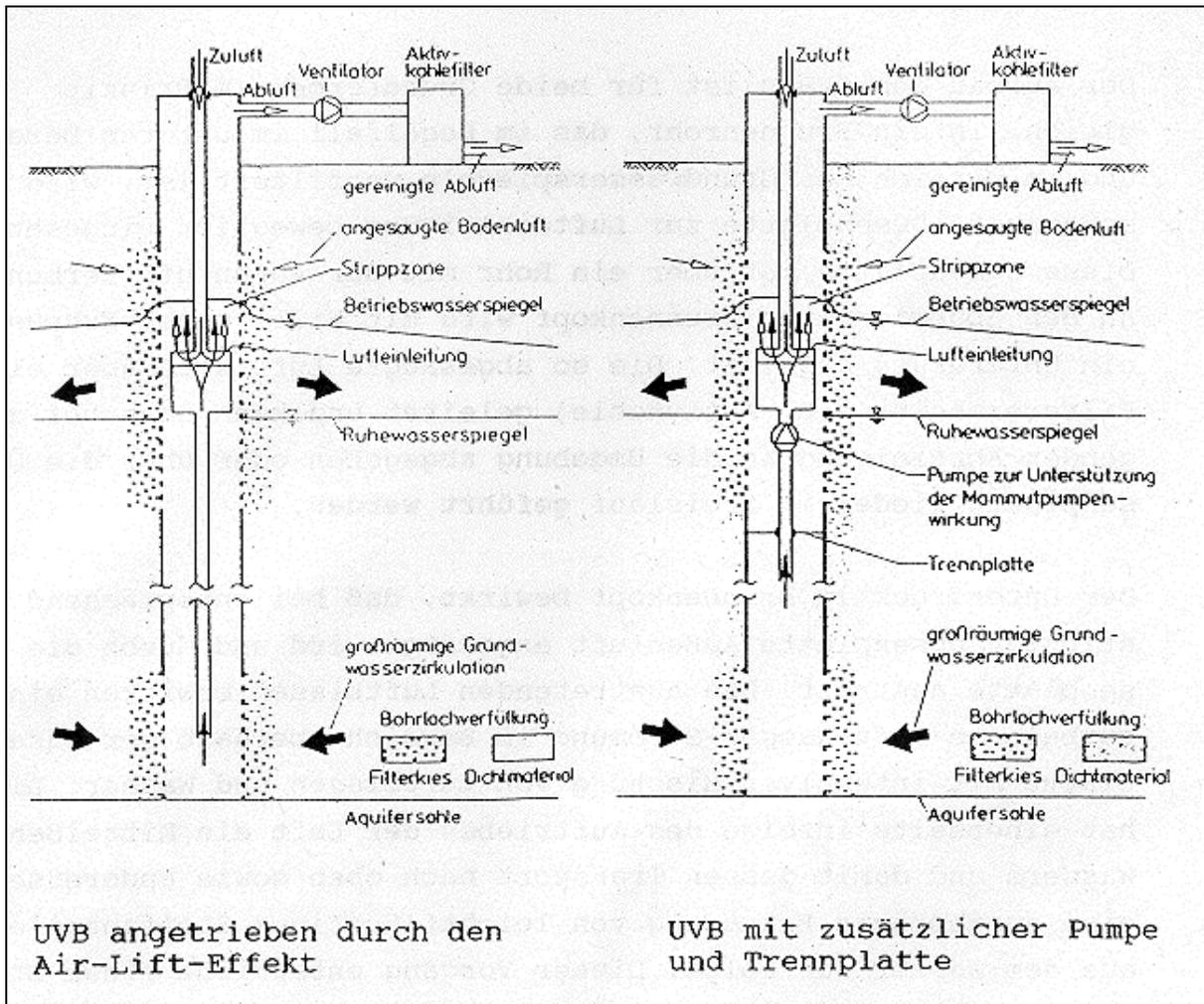


Abb. 2.1: Prinzipielle Darstellung des Unterdruck-Verdampfer-Brunnens der Firma IEG, Reutlingen (aus /18/)

## 2.1 UVB-Verfahren der Firma IEG, Reutlingen

Der prinzipielle Aufbau eines Unterdruck-Verdampfer-Brunnens (UVB) der Firma IEG, Reutlingen, kann Abbildung 2.1 entnommen werden. Es sind zwei Grundformen des UVB zu unterscheiden:

- die Wasserbewegung im Brunnen kommt allein durch den Air-Lift-Effekt zustande (linkes Bild in Abbildung 2.1)
- die Wasserbewegung im Brunnen wird zusätzlich durch eine Trennplatte und eine Pumpe im Förderrohr bewirkt (rechtes Bild in Abbildung 2.1).

Der Aufbau des UVB's ist für beide Grundformen im Prinzip gleich. In ein Brunnenrohr, das im Regelfall im unteren Bereich und im Bereich des Grundwasserspiegels verfiltert ist, wird eine sogenannte Düsenplatte zur Lufteinleitung beweglich eingesetzt. Diese Düsenplatte ist über ein Rohr mit der Außenluft verbunden. An den abgedichteten Brunnenkopf wird mit Hilfe eines Exhaustors ein Unterdruck angelegt. Die so abgesaugte Luft wird über eine Filtereinheit (z.B. Aktivkohle) geleitet und kann dann bei genügender Abreinigung an die Umgebung abgegeben oder über die Düsenplatte wieder im Kreislauf geführt werden.

Der Unterdruck im Brunnenkopf bewirkt, daß bei entsprechend justierter Düsenplatte Außenluft angesaugt wird und durch die Düsenplatte austritt. Die austretenden Luftblasen bewirken eine turbulente Luft-Wasser-Strömung im Bereich oberhalb der Düsenplatte mit intensiver Mischung von Luftblasen und Wasser. Dies hat einerseits infolge des Auftriebes der Luft ein Mitreißen des Wassers und damit dessen Transport nach oben sowie andererseits eine ausgeprägte Entgasung von leichtflüchtigen Stoffanteilen aus dem Wasser zur Folge. Dieser Vorgang entspricht einer Strippung.

Durch die Strömung des Luft-Wasser-Gemisches nach oben wird der Wasserspiegel im Brunnenrohr angehoben und es stellt sich ein Fließgradient in Richtung des umgebenden Grundwassers ein. D.h. durch die obere Verfilterung tritt in der Regel das mehr oder weniger weit abgereinigte Grundwasser wieder aus dem Brunnen aus und durch die untere Verfilterung tritt Grundwasser in den Brunnen ein.

Da die Fließwiderstände im Brunnenrohr erheblich geringer sind als im Aquifer, kann es im Grundfall (linkes Bild in Abbildung 2.1) auch zu einer Zirkulationsströmung im Brunnen selbst kommen. Dieser Effekt wird durch den Einbau einer Trennplatte unterbunden. Um in diesem Fall den Wasserdurchsatz zu verstärken, wird zusätzlich eine Pumpe eingebaut (siehe Abbildung 2.1, rechtes Bild). Durch diese Pumpe kann auch die Richtung der Wasserzirkulation bestimmt werden. D.h. wahlweise ist auch die Entnahme des Wassers im Bereich der oberen Verfilterung und die Rückgabe im Bereich der unteren Verfilterung möglich. Je nach Anordnung der oberen Verfilterung kann bei diesem Verfahren zusätzlich gleichzeitig die Bodenluft über dem Grundwasserspiegel abgesaugt werden.

Seit den ersten Einsätzen des UVB Mitte der achtziger Jahre wurden verschiedene Varianten entwickelt, die sich aus den jeweils vorliegenden Schadensfällen ergaben, wobei jedoch das oben beschriebene Grundprinzip beibehalten wurde. Auf einige dieser Varianten wird in Abschnitt 2.5 näher eingegangen.

## 2.2 Überdrucksanierungsbrunnen der Firma SANTEC, Berlin

Der prinzipielle Aufbau eines **Überdrucksanierungsbrunnens** der Firma SANTEC, Berlin, ist Abbildung 2.2 zu entnehmen. Im Unterschied zum UVB-Verfahren wird bei diesem Brunnen die Zirkulationsströmung des Grundwassers durch das Einpressen von Gas bewirkt.

Innerhalb eines im unteren Bereich und im Bereich der Grundwasseroberfläche verfilterten Brunnens wird ein System mehrerer ineinander gesteckter Rohre eingebaut. Durch dieses System wird das Gas unter Überdruck zum Begaser nach unten geführt, wo es austritt und die aufsteigenden Gasblasen das Wasser mitreißen. Bei dieser Durchspülung des Wassers strip-pen, wie beim UVB-Brunnen, die leichtflüchtigen Wasserinhaltsstoffe aus, werden mit der Abluft aus dem Brunnen abgeleitet und können außerhalb mit Hilfe von Aktivkohle-Filtern aus der Abluft gefiltert werden. Durch die Strömung des Luft-Wasser-Gemisches nach oben wird auch hier das Wasser im Brunnenrohr angehoben und es stellt sich ein Fließgradient in Richtung des umgebenden Grundwasserspiegels ein.

Bedingt durch die mehrfache Umlenkung des abströmenden Wassers erfolgt entlang des Fließweges eine intensive Ausgasung bis zum Wiederzufluß zum Grundwasser. Durch die Betriebsweise wird nur das Grundwasser abgereinigt und es kann gleichzeitig keine Bodenluft mit abgesaugt werden.

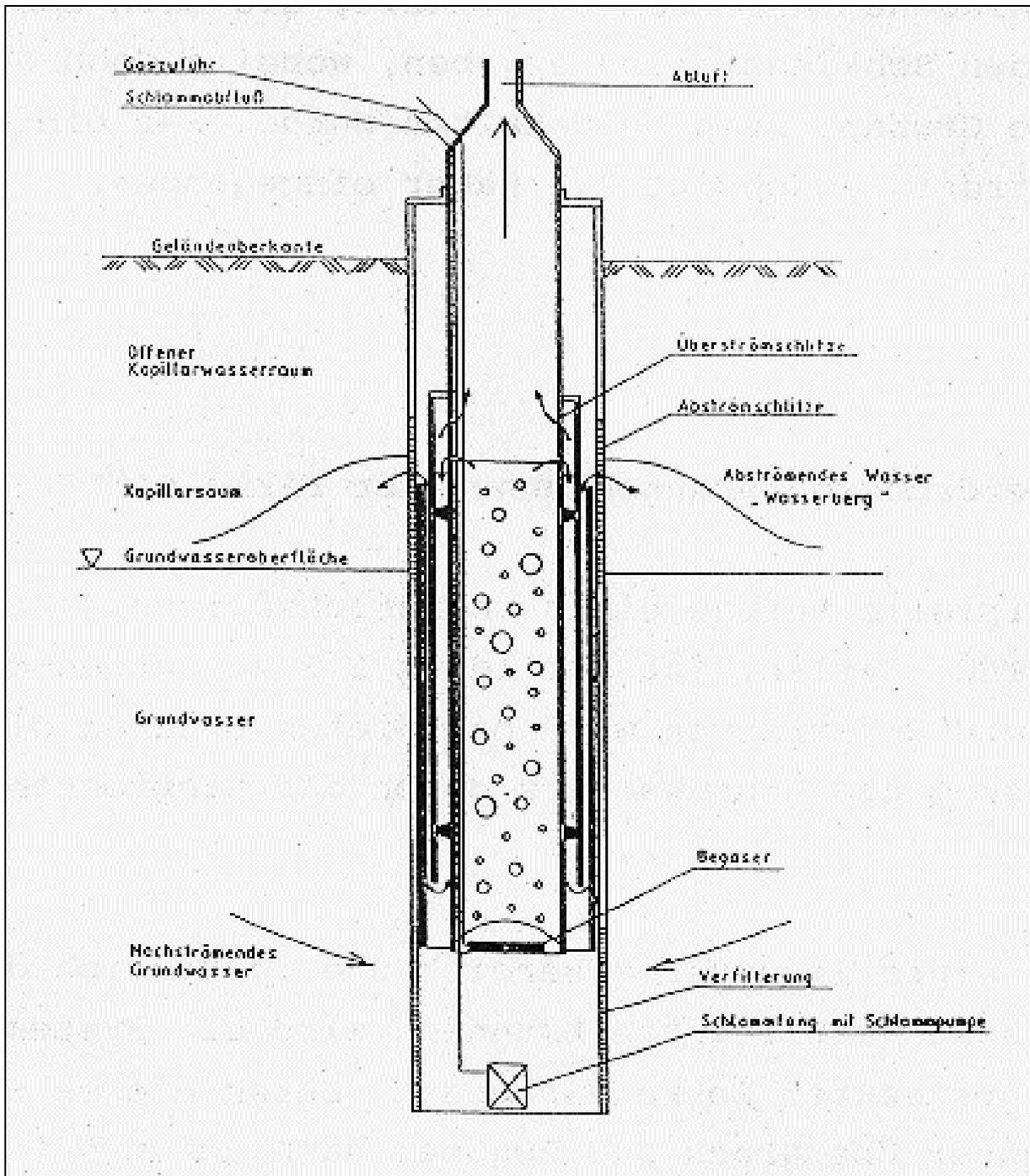


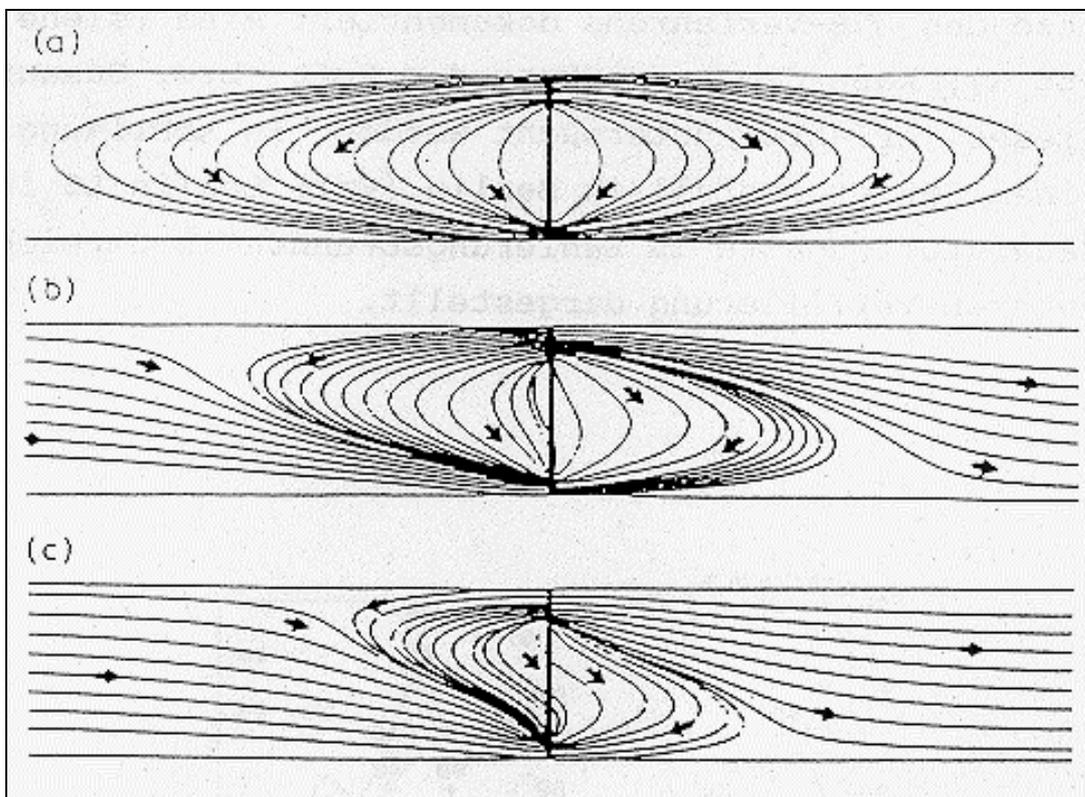
Abb. 2.2: Überdrucksanierungsbrunnen der Firma SANTEC, Berlin (nach /22/)



## 2.4 Gesamtbetrachtung der Verfahren

Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten nach einer Einführung die Sanierungsbrunnen der drei Anbieter IEG, SANTEC und ZÜBLIN beschrieben wurden, wird hier ein Vergleich sowie eine erste Bewertung der drei Sanierungsbrunnen vorgenommen.

Bei allen drei Brunnen handelt es sich um in Situ-Strip-Verfahren mit Grundwasser-Zirkulation. Wie bereits oben beschrieben, erfolgt durch die intensive Luftaufnahme im Brunnen mittels Desorption bzw. Strippen eine Überführung der leichtflüchtigen Schadstoffe aus der Wasserphase in die Luft- bzw. Gasphase. Bei diesem Durchperlen der Luft bzw. des Gases erfolgt durch den sogenannten Air-Lift-Effekt eine Anhebung des Wasserspiegels über den umgebenden Grundwasserspiegel im Brunnen. Bedingt dadurch wird aus Kontinuitätsgründen im unteren Bereich des Brunnens Wasser angesaugt und im oberen Bereich des Brunnens infolge des Druckgradienten Wasser in den Aquifer abgegeben. Die Entnahme aus dem unteren Bereich des Aquifers und die Rückgabe in den oberen Bereich bewirken im Aquifer eine Zirkulationsströmung von der oberen Verfilterung zur unteren Verfilterung (siehe Abbildung 2.4 a). Die Ausbreitung dieser Zirkulationsströmung hängt von der Fördermenge, den anstehenden Untergrundverhältnissen (insbesondere auch von der Anisotropie des Grundwasserleiters) und von der natürlichen Grundwasserfließgeschwindigkeit ab (siehe Abbildung 2.4). Da die Auswirkungen des Untergrundes, der Anisotropie und der Grundwasserfließgeschwindigkeit auf die Wirkung des GZB's im Feld bisher noch nicht hinreichend untersucht und nachgewiesen bzw. in ihren Teilvorgängen verdeutlicht wurden, wird in Abschnitt 4 dieses Berichtes unter Zuhilfenahme eines numerischen Modells eine Veranschaulichung der Einflüsse verschiedener Parameter auf das Umfeld eines GZB's versucht.



**Abb. 2.4: Stromlinien dargestellt in vertikalen Längsschnitten mit natürlichen Grundwasserfließgeschwindigkeiten (DARCY) von (a) 0,0 m/d, (b) 0,3 m/d und (c) 1,0 m/d (aus /18/)**

Neben den örtlichen Einflüssen des jeweiligen Sanierungsfalles auf die Grundwasser-Zirkulation lassen sich durch den Air-Lift-Effekt Einflüsse auf das umgebende Grundwasser nicht ausschliessen. So erfolgt z.B. durch die turbulente Durchmischung in der Strip-Zone eine Übersättigung des geförderten Wassers mit Luft bzw. Gas. Damit dieses übersättigte Wasser nicht direkt in den Aquifer gelangt und dort eventuell zu Verockerungen oder sonstigen durch Luftausscheidung verursachten Effekten führt, ist beim SANTEC-Verfahren eine längere Fließstrecke (Syphon) zwischen Strip-Zone und Rückgabe ins Grundwasser angeordnet, beim ZÜBLIN-Verfahren erfolgt die Ausgasung innerhalb des Mantelrohres vor der Abgabe ins Grundwasser.

Da zur Beurteilung der Wirkung der verschiedenen Verfahren nur Einsätze des UVB-Verfahrens dokumentiert sind (siehe auch Abschnitt 3), kann die Auswirkung der Luft- bzw. Gasaufnahme nur für dieses Verfahren untersucht werden. In Abbildung 2.5 sind für einen Sanierungsfall in Berlin (Fall Berlin L5 in Anlage 1) die Sauerstoffgehalte im Sanierungsbrunnen im Bereich der oberen und unteren Verfilterung dargestellt.

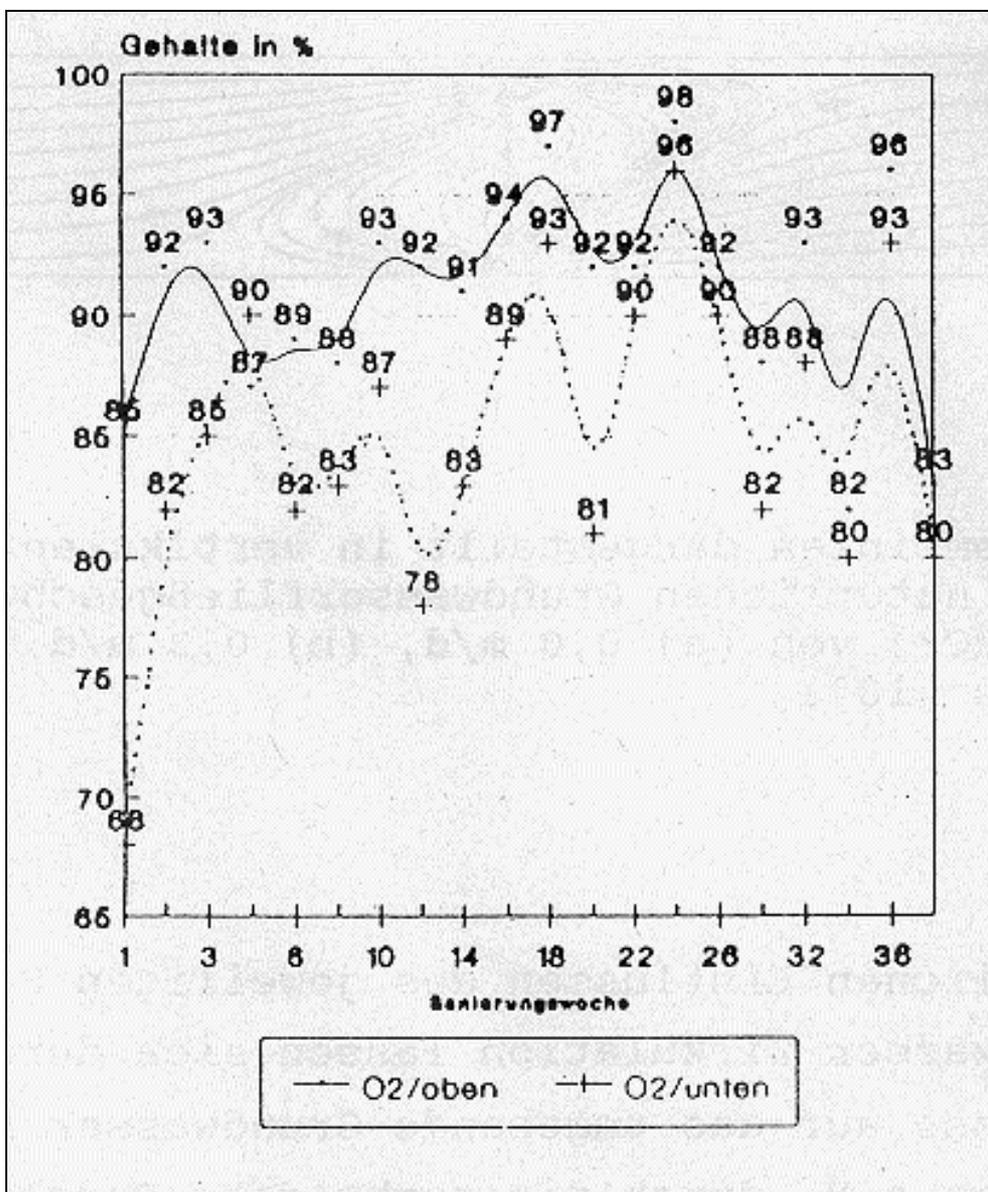


Abb. 2.5: Ganglinien des Sauerstoffgehaltes im Grundwasser eines UVB in Berlin (aus /15/)

Hier ist im unteren Verfilterungsbereich eine Zunahme des Sauerstoffgehaltes um etwa 20 % von der 1. Sanierungswoche bis etwa zur 5. Sanierungswoche zu beobachten. Da leider keine Sauerstoffmessungen aus der Grundwasserzirkulationswalze im Umfeld des Sanierungsbrunnens vorliegen, kann keine Aussage über die Reichweite der Sauerstoffanreicherung im Grundwasser getroffen werden. In der Literatur (/15/) wird lediglich angegeben, daß sich an den einzelnen Meßstellen im oberen Aquiferbereich grössere Sauerstoffgehalte einstellen. Aus dieser Aussage und Abbildung 2.5 kann daher geschlossen werden, daß

- ein Austrag von gelöstem Sauerstoff in den Aquifer statt findet,
- in diesem speziellen Fall eventuell eine Zirkulationsströmung innerhalb des Brunnens vorliegt.

Grundsätzlich kann eine Erhöhung des Sauerstoffgehaltes im Grundwasser sowohl zu positiven Effekten (z.B. Erhöhung der Produktivität von Bakterien und Mikroorganismen) als auch zu negativen, z.B. in Form von Verockerungen, führen. So sind anaerobe Mikroben sehr selektiv und brauchen nicht nur sauerstofffreie Bedingungen sondern auch ein Redoxpotential  $> 0,2$ . Der anaerobe Abbau erfolgt meist unter methanogenen Bedingungen und ein relativ häufiges Zwischenprodukt beim Abbau von Lösungsmitteln wie Tetrachlorethen (PER) und Trichlorethen (TRI) ist das cis-1.2 (DCEC), trans-1.2 (DCET), 1.1-Dichlorethen sowie das hochgiftige Vinylchlorid (VC). Beim aeroben Abbau benötigen die Bakterien vielfach eine gewisse Adaptionszeit, um einen Abbau in Gang bringen zu können /6/. Sollen die Folgen einer Sauerstoffanreicherung des Grundwassers reduziert werden, ist die abgeleitete Luft im Kreislauf zu führen, wobei in diesem Fall beim UVB-Verfahren auf das gleichzeitige Absaugen der Bodenluft verzichtet werden muß. Bei einer Kreislaufführung kann außerdem statt Luft ein inertes Gas verwendet werden, was mögliche Reaktionen im und um den Brunnen durch den andernfalls nicht unerheblichen Sauerstoffdurchsatz verhindert.

Zur Beurteilung der Auswirkungen des Sauerstoff- bzw. Gaseintrages auf das chemisch-physikalische Milieu in Boden und Grundwasser reicht allerdings der heutige Wissensstand nicht aus. Hier besteht demgemäß unbedingt weiterer Untersuchungsbedarf. Prinzipiell können sich die bestehenden Gleichgewichte im Wasser infolge Ausgasung (beispielsweise von  $\text{CO}_2$ ) verschieben. Dadurch können Reaktionen im Abstrom des Brunnens hervorgerufen werden.

Die Durchmischung von Luft und Wasser innerhalb des Brunnens führt zu einer stark turbulenten und pulsierenden Wasserbewegung. Die dabei zustandekommenden Schwingungen können sich unter Umständen auch außerhalb des Brunnens auf das Korngerüst übertragen. Zusammen mit der verstärkten Strömung innerhalb der Grundwasser-Zirkulationswalze können dadurch gegebenenfalls bis dahin immobile Schadstoffe aktiviert und so dem Brunnen und damit einer Sanierung zugeführt werden, was allerdings hinsichtlich quantifizierbarer Auswirkungen noch weiterer Untersuchungen bedarf. Zusammen mit den unterschiedlichen Fließweglängen und Fließzeiten kann dies zu dem bei den dokumentierten UVB-Anwendungsfällen typischen Verlauf der Schadstoff-Konzentration im Abstrom führen, wie dies in Abbildung 2.6 dargestellt ist.

Möglicherweise ist dieser schwankende Verlauf auf eine in einigen der dokumentierten Fälle beobachtete Abnahme des Abluftvolumens mit der Zeit zurückzuführen. Eventuell wurde diese hervorgerufen durch das Zusetzen der Hauptfließwege im Aquifer infolge der verstärkten

hydraulischen Belastung durch die Grundwasserzirkulationswalze und durch erhöhten Unterdruck teilweise wieder ausgeglichen.

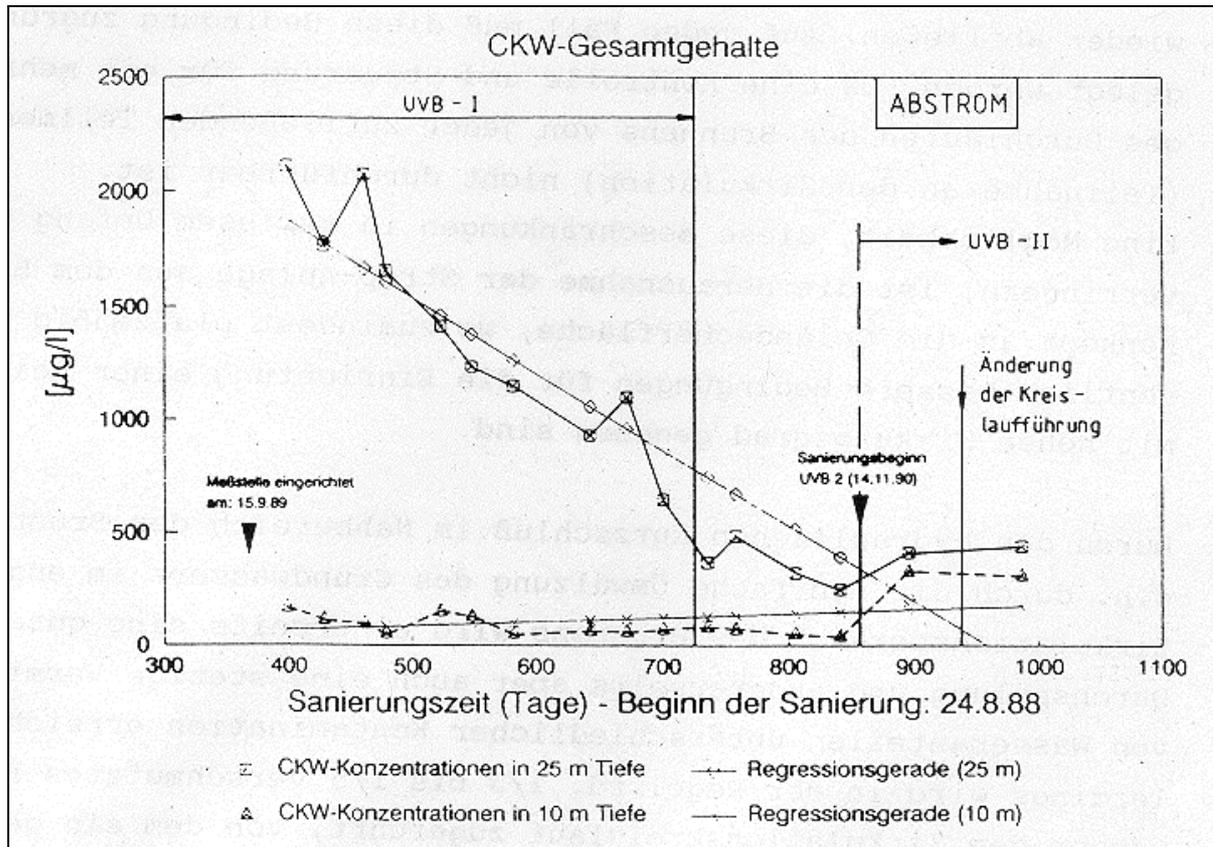


Abb. 2.6: Konzentrationsveränderungen in der Grundwassermeßstelle T-P11 (nach /18/)

Ein wesentlicher Aspekt, der bei der Anwendung eines GZB's zu beachten ist, ist die Menge des durchgesetzten Grundwassers. Diese Menge ist in bisherigen Fällen mit maximal ca. 20 bis 50 m<sup>3</sup>/h geringer als bei vergleichbaren hydraulischen Maßnahmen mit konventionellen Brunnen. In Abschnitt 4 bei den Modelluntersuchungen wird erkennbar, daß ein für eine GZB-Sanierung ausgebauter Brunnen durchaus auch mit einer größeren Entnahmemenge betrieben werden könnte. Allerdings ist vermutlich durch den im Verhältnis zu einer oberirdischen Strippung jedoch relativ geringen Strip-Bereich im Innern des GZB dieses System in seiner hydraulischen Leistung eingeschränkt, da eine ausreichende Abreinigung von Wasseranteilen gewährleistet werden soll, auch wenn diese nur einmal den Brunnen durchlaufen und anschließend wieder abfließen. Auf jeden Fall muß diese Bedingung zugrundegelegt werden, da eine Kontrolle und Steuerung für ein mehrmaliges Durchlaufen des Brunns von jeder zufließenden Teilmenge (Teilnahme an der Zirkulation) nicht durchführbar ist.

Eine Möglichkeit, diese Beschränkungen in gewissem Umfang zu verringern, ist die Herausnahme der Strip-Anlage aus dem Brunnenkopf an die Geländeoberfläche, wo zumindest platzmäßig wesentlich bessere Bedingungen für die Einrichtung einer Reinigung mit hohem Wirkungsgrad gegeben sind.

Durch den hydraulischen Kurzschluß im Nahbereich des Brunns, d.h. durch die mehrfache Umwälzung des Grundwassers im engeren Zirkulationsbereich des Brunns wird einerseits

eine gute Durchspülung und andererseits aber auch eine stetige Vermischung von Wasseranteilen unterschiedlicher Kontamination erreicht. Allerdings wird in der Regel rd. 1/3 bis 1/5 verschmutztes Fremdwasser dem Zirkulationskreislauf zugeführt, von dem ein gewisser Anteil nach nur einmaliger Strippung im Brunnen wieder abströmt.

Die notwendigerweise geringen Brunnendurchsätze beim üblichen GZB und die spezielle Erfassung des Grundwasserzuströmes aus einer gegenüber dem konventionellen Brunnen verringerten Querschnittsfläche (siehe Abschnitt 4 und Anlage 2) bedingen auch einen höheren Aufwand gegenüber konventionellen Brunnen beim Einsatz einer Reihe von GZB's zur Abschirmung einer breiten Kontaminationsfahne. Zur sicheren Erfassung des gesamten Zuströmes einer breiten Verunreinigungsfahne ist dabei eine deutlich höhere Brunnenanzahl erforderlich, die je nach Untergrundbedingungen 3- bis 10-fach gegenüber konventionellen Brunnen sein kann. Da andererseits ein GZB wegen der notwendigen Innenausstattung auch bei geringerem Durchsatz kaum kleiner dimensioniert werden kann als ein konventioneller Brunnen entsprechenden oder höheren Durchsatzes, ergeben sich schon ohne die Kosten der Inneneinrichtung beim Brunnenbau notwendigerweise höhere Aufwendungen.

Durch die besondere Wirkungsweise der intensiven Durchspülung einer Kontamination durch die Grundwasserzirkulation bietet sich das GZB-Verfahren vor allem zur Anwendung im Schadenszentrum an. Da hier häufig eine Bebauung und damit ein setzungsempfindlicher Bereich vorliegt, kommen als Vorteile des GZB-Verfahrens die geringe Änderung des Grundwasserspiegels und der geringe Platzbedarf zum Tragen.

Wie die Modelluntersuchungen in Abschnitt 4 zeigen, kommt es bei Vorhandensein einer wesentlich geringer durchlässigen Schicht zwischen oberer und unterer Verfilterung zu einer deutlichen Vergrößerung des Zirkulationsbereiches. Je nach örtlicher Lage der Schadstoffe kann es bei Nichterkennen dieser Schichtung zu einem ungünstigen Austrag von Schadstoffanteilen kommen. Im Extremfall kann nicht vollständig abgereinigtes Grundwasser in einen bis dahin unverschmutzten Grundwasserbereich ausgetragen werden bzw. durch die Einleitung teilgereinigten Grundwassers in einen kontaminierten Bereich kann es zu einer Verdünnung und damit zu einer Pseudo-Sanierung kommen. Bei Vorliegen von zwei getrennten Grundwasserstockwerken ist daher die Anwendung des Grundwasser-Zirkulations-Brunnens zu unterlassen.

Durch das in dieser Untersuchung beschriebene GZB-Verfahren werden nur strippbare Schadstoffe aus dem Grundwasser im Zirkulationsbereich des Brunnens entfernt. Bei Vorhandensein von anderen, nicht strippbaren Stoffen (wie z.B. PAK's) sind unbedingt eine intensive Kontrolle und ggf. zusätzliche Maßnahmen im Abstrom vorzusehen, um einer Verschleppung der Kontamination vorzubeugen.

## **2.5 Varianten des GZB-Verfahrens und Kombination mit anderen Sanierungsverfahren**

Da es sich bei den Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB) im Prinzip um die Kombination von Schluck- und Entnahmehrunnen in einem Brunnen handelt, ist dieses Grundsystem recht offen und kann an die verschiedensten Fragestellungen angepaßt werden. Seit den ersten Anwendungen dieses Verfahrens Mitte der 80-er Jahre sind ständig neue Ausbauförmungen entwic-

kelt und getestet worden. So gibt es z.B. speziell für das UVB-Verfahren verschiedene Verfahrensvarianten:

- Möglichkeit der Wasserbehandlung in oberirdischen Reaktoren mit Rückführung in den Grundwasserleiter
- Möglichkeit zur Kreislaufführung der zur Strippung benötigten Luft bzw. Gas
- Ausstattung des Brunnens mit Aktivkohle und Biofiltern
- Entnahme von Teilströmen aus der Grundwasser-Zirkulation
- Zugabe von Nährstoffen in den Kreislauf zur Anregung biologischer Prozesse

Wird das entnommene Grundwasser nicht innerhalb des Brunnens abgereinigt und sofort wieder zurückgegeben, sondern in oberirdische Reaktoren und Strip-Einheiten geleitet, erweitern sich die Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens. Durch Strippung allein sind allerdings nur leichtflüchtige Schadstoffe behandelbar. Bei Vorhandensein von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK's) oder von Schwermetallen können diese nur durch eine entsprechende Nachbehandlung erfaßt und dem Grundwasser entzogen werden. Zusätzlich kann außerhalb das Volumen der Strip-Einheit vergrößert werden und ist nicht mehr an die Ausbaugröße des Brunnens gebunden. Da dabei entsprechende Entgasungszonen vorgesehen werden können, ist eine Überwachung des rückfließenden Wassers und damit eine Bewertung der Abreinigung zwischen Entnahme und Rückgabe möglich.

Durch eine Kreislaufführung von Luft/Gas über Strip-Zone, Exhaustor und Aktivkohlefilter kann der Sauerstoffeintrag in das Grundwasser reduziert bzw. ausgeschlossen werden. Damit wird die Gefahr einer Brunnenverockerung bzw. -verkalkung herabgesetzt. Diese Variante ist beim Vorliegen erhöhter Eisen und/oder Mangangehalte dringend zu empfehlen.

Die Ausstattung des Brunnens selbst mit Aktivkohle- und Biofiltern erscheint zwar bei sehr begrenzten Verhältnissen über Gelände anwendbar, jedoch sind hier durch das zur Verfügung stehende geringe Volumen für die Filtereinheiten der Abreinigung Grenzen gesetzt. Zusätzlich wird eine Bewertung der Sanierung durch die stark eingeschränkte Kontrollmöglichkeit der Vorgänge im Sanierungsbrunnen sehr schwierig.

Über die Zugabe von Nährstoffen in den Kreislauf der Grundwasser-Zirkulations-Strömung besteht eine Möglichkeit, den mikrobiellen Abbau zu fördern. So können z.B. durch die Zugabe von Nitraten bzw. Sulfaten unter bestimmten Bedingungen Mikroorganismen diese sauerstoffhaltigen Verbindungen reduzieren und damit Sauerstoff für ihre Veratmung gewinnen.

Wegen der Vielfalt und schweren Kontrollierbarkeit der Varianten ist eine Bewertung und Empfehlung allerdings nur sehr begrenzt möglich. Außerdem liegen für die verschiedenen Varianten noch keine ausreichend dokumentierten Sanierungsergebnisse vor.

Bei Grundwasser-Zirkulations-Brunnen handelt es sich um eine spezielle Verfahrensweise der hydraulischen Sanierung, die in relativ durchlässigem Untergrund mehr oder weniger effizient anwendbar ist. Bei den GZB ist wie bei anderen hydraulischen Verfahren eine Kombination mit anderen Sanierungsverfahren möglich bzw. durch die Art des Brunnenausbaus von vornherein vorsehbar. Je nach Art der Untergrundkontamination ist zur Abreinigung des Kapillarsaumes und der Bodenluft eine Bodenluftabsaugung vorzusehen. Dabei ist abzuwägen, ob beispielsweise beim UVB-Verfahren die Bodenluftabsaugung in Kombination mit dem GZB

oder als eigene Systemeinheit vorzusehen ist. Für eine Kombination spricht, daß zur Erzeugung des Unterdruckes und zur Abreinigung nur jeweils eine Systemeinheit benötigt wird. Dagegen spricht, daß der UVB in der Regel nur mit einem geringen Unterdruck betrieben wird und die Bilanzierung der einzelnen Schadstoffe (aus Grundwasser oder Bodenluft) sehr schwierig ist.

### 3. Darstellung und Beurteilung von Anwendungsfällen des GZB

In der bisher veröffentlichten Literatur und einer Erhebung der technischen Daten von Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB) /19/ sind insgesamt 23 Anwendungsfälle von Unterdruck-Verdampfer-Brunnen (UVB) dokumentiert, davon werden 2 Anwendungsfälle sowohl in der Literatur (7 Fälle) als auch in der Erhebung (16 Fälle) beschrieben. Von Seiten der anderen Anbieter lagen zwar zum Zeitpunkt der Bearbeitung noch keine ausreichend dokumentierten Anwendungsfälle vor, jedoch konnten zumindest die mündlichen Angaben zu den Hauptausbaudaten einiger Fälle mit den dokumentierten UVB-Anwendungen verglichen werden.

Da die Dokumentation der einzelnen Fälle recht unterschiedlich ist, wurde in Anlage 1 eine tabellarische Zusammenstellung der zur Beurteilung wichtigsten Größen vorgenommen. Neben der Projektbezeichnung und der Quelle enthält die Tabelle Angaben zu den erkundeten Schadstoffen, die wichtigsten Daten zum eigentlichen Brunnen, Angaben zur Bodenart, zum Eintragungsort, zu den durchgeführten Voruntersuchungen und Messungen sowie zur Betriebsdauer des UVB. Als letzter Punkt werden Besonderheiten der einzelnen Anwendungsfälle aufgeführt. In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Daten der in Anlage 1 beigefügten Anwendungsfälle zusammenfassend aufgeführt.

**Tabelle 3.1: Zusammenfassung der wichtigsten Daten der in Anlage 1 beigefügten Anwendungsfälle**

	Anzahl d. Fälle [-]	Anteil [%]
<b>Gutachter:</b>		
BWU	7	44
GLA Freiburg	1	6,2
Harreß Geotechnik	4	25
HYDRODATA	1	6,2
Jungbauer	1	6,2
Wasser-Müller	1	6,2
K. A.	1	6,2
<b>Betriebsweise:</b>		
allein durch Air-Lift-Effekt	9	43
mit Pumpe / mit Trennplatte	7	33
beide Betriebsweisen	3	14
K. A.	2	10
<b>Brunnenausbau:</b>		
Brunnen durchgehend verfiltert	4	19
obere und untere Verfilterung mit geschlossenem Zwischenstück	15	71
K. A.	2	10

Ausbauerdurchmesser	DN 150 - DN 800	überwiegend DN 400
wirksame Brunnenlängen	3,0 m - 34,0 m	
$k_f$ -Wert	$1 \cdot 10^{-3}$ bis $2,4 \cdot 10^{-6}$ m/s	
<b>Fördermengen:</b>		
Wasser	$0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ - $20 \text{ m}^3/\text{h}$	
Luft	$110 \text{ m}^3/\text{h}$ - $860 \text{ m}^3/\text{h}$	
<b>Konzentration vor Sanierung:</b>		
Wasser	100 $\mu\text{g/l}$ - 300.000 $\mu\text{g/l}$	
Luft	$1.500 \mu\text{g/m}^3$ - $9.000.000 \mu\text{g/m}^3$	

Vergleicht man die einzelnen Fälle, so wird ersichtlich, daß der Umfang ihre Dokumentationen recht unterschiedlich sind. Bei einigen Fällen sind die verfügbaren Angaben recht dürftig, bei anderen wieder sind fast alle Größen vorhanden, wobei die neueren Fälle in der Regel besser dokumentiert sind.

Ein Großteil der Anwendungsfälle liegt in Baden-Württemberg, was zum einen mit dem Sitz der patentinhabenden Firma (IEG Reutlingen) zusammenhängt, zum anderen bezog sich die Erhebung der technischen Daten /19/ auf Anwendungsfälle speziell in Baden-Württemberg.

Aus Tabelle 3.1 geht hervor, daß in ca. 44 % der Fälle die Firma BWU und in 25 % der Fälle die Firma Harreß Geotechnik als Gutachter genannt. D.h., mehr als 2/3 der erhobene Fälle wurden von zwei Firmen durchgeführt und betreut.

Zur Betriebsweise ist anzumerken, daß beim UVB-Verfahren grundsätzlich 2 Varianten möglich sind (näheres siehe bei Beschreibung des UVB-Verfahrens):

- Der Brunnen wird nur nach dem Air-Lift-Effekt betrieben, d.h. die Förderung des Wassers im Brunnen geschieht allein durch Unterdruck; es wird in diesem Fall keine Trennplatte (o.T.) und keine Pumpe (o.P.) eingebaut.
- Der Brunnen wird mit einer Trennplatte (m.T.) und einer Pumpe (m.P.) ausgestattet.

Von den insgesamt 21 dokumentierten Anwendungsfällen des Unterdruck-Verdampfer-Brunnen (UVB) wurden 9 Brunnen (43 %) nach dem Prinzip des Air-Lift-Effektes betrieben, 7 Brunnen (33 %) waren von Anfang an mit Trennplatte und Pumpe ausgerüstet, bei 3 Brunnen (14 %) kamen beide Varianten zum Einsatz und bei 2 Brunnen (10 %) wurden keine Angaben gemacht. Der Ausbau-Durchmesser der Brunnen liegt zwischen DN 150 und DN 800, wobei die Mehrzahl der Brunnen einen Durchmesser von DN 400 hat. Die wirksame Brunnenlänge, d.h. der Abstand zwischen Beginn des oberen Filterrohres und Ende des unteren Filterrohres, liegt zwischen 3 m und ca. 34 m.

Beim Ausbau der Brunnen sind zwei Ausbautypen zu unterscheiden:

- Die gesamte wirksame Brunnenlänge ist als Filterrohr ausgebildet (in insgesamt 4 von 21 Fällen).
- Zwischen dem oberen und unteren Filterrohr ist ein geschlossenes Rohrstück eingebaut (in insgesamt 15 von 21 Fällen).

Der im Bereich der wirksamen Brunnenlänge anzutreffende Boden hat Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) zwischen  $1 \cdot 10^{-3}$  und  $2,4 \cdot 10^{-6}$  m/s, d.h. der bisherige Anwendungsbereich erstreckt sich auf die Bodenarten Grobsand bis Schluff.

Die Fördermenge beim Betrieb der Brunnen ist nur in wenigen Fällen angegeben und liegt zwischen  $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ . Fast immer ist die Menge der abgesaugten Luft (Abluft) angegeben. Sie liegt zwischen  $110 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $860 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Die bisher beschriebenen Angaben zu Brunnen und anstehendem Untergrund sind bei allen Fällen fast vollständig erfaßt, was für die Sanierungsgrößen nicht gesagt werden kann. Hier sind mangels ausreichender und dokumentierter Voruntersuchungen die Ausgangssituationen der einzelnen Anwendungsfälle nur unzureichend erfaßt. Die Schadstoffe im Boden sind zwar überall angegeben, es fehlen jedoch häufig die Konzentrationen vor Betrieb des Brunnens (sogenannter Null- oder Ausgangszustand). Bei der Nullkonzentration ist zwischen der Konzentration in der Bodenluft und im Grundwasser zu unterscheiden. Der Bereich der angegebenen Konzentrationen vor Beginn der Sanierung liegt zwischen 100 und 300.000  $\mu\text{g/l}$  für das Grundwasser und zwischen 1.500 und 9.000.000  $\mu\text{g/m}^3$  für die Bodenluft. Ein Sanierungsziel wird nur in 2 Fällen angegeben.

Der Schadstoffaustrag wird in der Regel über mittlere Abluftkonzentration und mittlere Abluftmengen bzw. über adsorbierte Schadstoffe an der Aktivkohle rückgerechnet. Da hier die Betriebsdauer des Sanierungsverfahrens und die Menge des in den Untergrund gelangten Schadstoffes einen Einfluß haben, können die absoluten Angaben nicht für eine Bewertung herangezogen werden.

Wurden Angaben über die Zusammensetzung der Abluft hinsichtlich Anteil Bodenluft an der Abluft, Temperatur und Feuchte gemacht, so liegt der Bodenluftanteil der Abluft zwischen 12 und 90 %. D.h. im ersten Fall wird fast keine Bodenluftabsaugung vorgenommen und im letzten Fall wird fast alle benötigte Luft aus dem Boden abgezogen. Die Temperatur der Rohluft liegt zwischen 18 und 33°C und die Feuchte zwischen 31 und 65 % und damit in der Regel unter der Luftfeuchtigkeit der Außentemperatur.

Nachdem oben eine zusammenfassende Darstellung der in Anlage 1 tabellarisch aufgeführten Anwendungsfälle des UVB-Verfahrens gegeben wurde, wird im folgenden auf einige Anwendungsfälle speziell eingegangen.

Zu den Anwendungsfällen UVB-I und UVB-II im Rhein-Ruhr-Gebiet (Fall L1 und L2 in Anlage 1) ist zu sagen, daß es sich beim Sanierungsbrunnen UVB-I um einen Testlauf für die Anwendung des UVB-Verfahrens bei diesem Schadensfall handelt. Die Systemeinheit des UVB's wurde in einen bestehenden, vollständig verfilterten Brunnen eingebaut, der 12,50 m tief abgeteuft war. Am Einbauort hat der anstehende Grundwasserleiter eine Mächtigkeit von ca. 33 m, d.h. es handelt sich in diesem Fall um einen unvollkommenen Brunnen. Die Verfilterung wurde bis 2 m über den Grundwasserstand ausgeführt, d.h. in dieser Testphase wurde zusätzlich Bodenluft abgesaugt. Da der UVB nach dem Mammutpumpenprinzip betrieben wurde, ist eine genaue Bestimmung der Fördermenge nicht möglich und die angegebene Fördermenge von  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  ist als Anhaltswert zu verstehen. Mangels entsprechender Meßgeräte konnte am Gesamtvolumenstrom der Luft von 300 - 500  $\text{m}^3/\text{h}$  der Bodenluftanteil nicht be-

stimmt werden, d.h. die Anteile der täglich ausgetragenen Schadstofffracht von 2,0 kg/d aus Bodenluft und Grundwasser sind nicht zu bestimmen. Nachdem anfänglich die Einzelkomponente TRI vorherrschte, stiegen mit zunehmender Sanierungsdauer die CIS-Gehalte von  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf  $9.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  an. Mangels einer ausreichenden Vorerkundung kann die Ursache für die erhöhten CIS-Gehalte nicht eindeutig geklärt werden, es liegt jedoch die Vermutung nahe, daß durch die Grundwasserzirkulation bzw. durch die Bodenluftabsaugung eine vorher nicht erkannte Altlast mobilisiert wurde.

Nachdem dieser Testbrunnen 2 Jahre betrieben wurde, wurde im November 1990 ein UVB mit Trennplatte und Pumpe zur Sanierung des gesamten Aquifers in einen neuen Brunnen eingebaut. Dieser Brunnen wurde bis auf eine Tiefe von ca. 40 m abgeteuft und mit insgesamt 3 Filterstrecken ausgebaut, d.h. es wurde im mittleren Bereich eine zusätzliche Filterstrecke eingebaut, um eine gezielte Abreinigung des Aquifers zu erreichen. In diesem Fall kann durch gezieltes Abpackern die Zirkulationsströmung gesteuert werden.

Beim Anwendungsfall Karlsruhe (Fall L3 in Anlage 1) handelt es sich um ein Testgebiet in der Fahne einer Grundwasserkontamination, das von der Universität Karlsruhe betreut wird. In diesem Anwendungsfall ist die Systemeinheit des Unterdruck-Verdampfer-Brunnens oberirdisch angeordnet, was sich für die durchzuführenden Untersuchungen als sehr sinnvoll erweist. Das in der Umgebung angeordnete Meßnetz mit der Anordnung von tiefendifferenzierten Grundwassermeßstellen (siehe Abbildung 5.3) und die Messungen am bzw. im Sanierungsbrunnen sind unter Berücksichtigung einengender örtlicher Gegebenheiten als gut zu bezeichnen. Im Rahmen einer erst nach Redaktionsschluß der vorliegenden Ausarbeitung fertiggestellten Diplomarbeit /26/ erfolgte eine systematische Auswertung der längerzeitigen intensiven Überwachung (Meßwertaufnahme mindestens einmal pro Tag) der zweiten Betriebsphase dieses GZB. Es ergab sich daraus erwartungsgemäß eine eindeutige Beeinflussung des Grundwassers bezüglich der Schadstoffkonzentrationen und der physikochemischen Parameter (pH-Wert, Leitfähigkeit, Sauerstoff). Im näheren Umkreis ( $\varnothing \approx 10 \text{ m}$ ) um den Brunnen sanken die LCKW-Konzentrationen innerhalb weniger Tage nach Inbetriebnahme des Brunnen auf Werte um  $10 \mu\text{g}/\text{l}$ . Im Abstrom zeigten sich deutliche Konzentrationsvermindierungen in den flachen Meßstellen nach ca. 6 Wochen (E8-flach) bzw. ca. 7 Wochen (E1-flach).

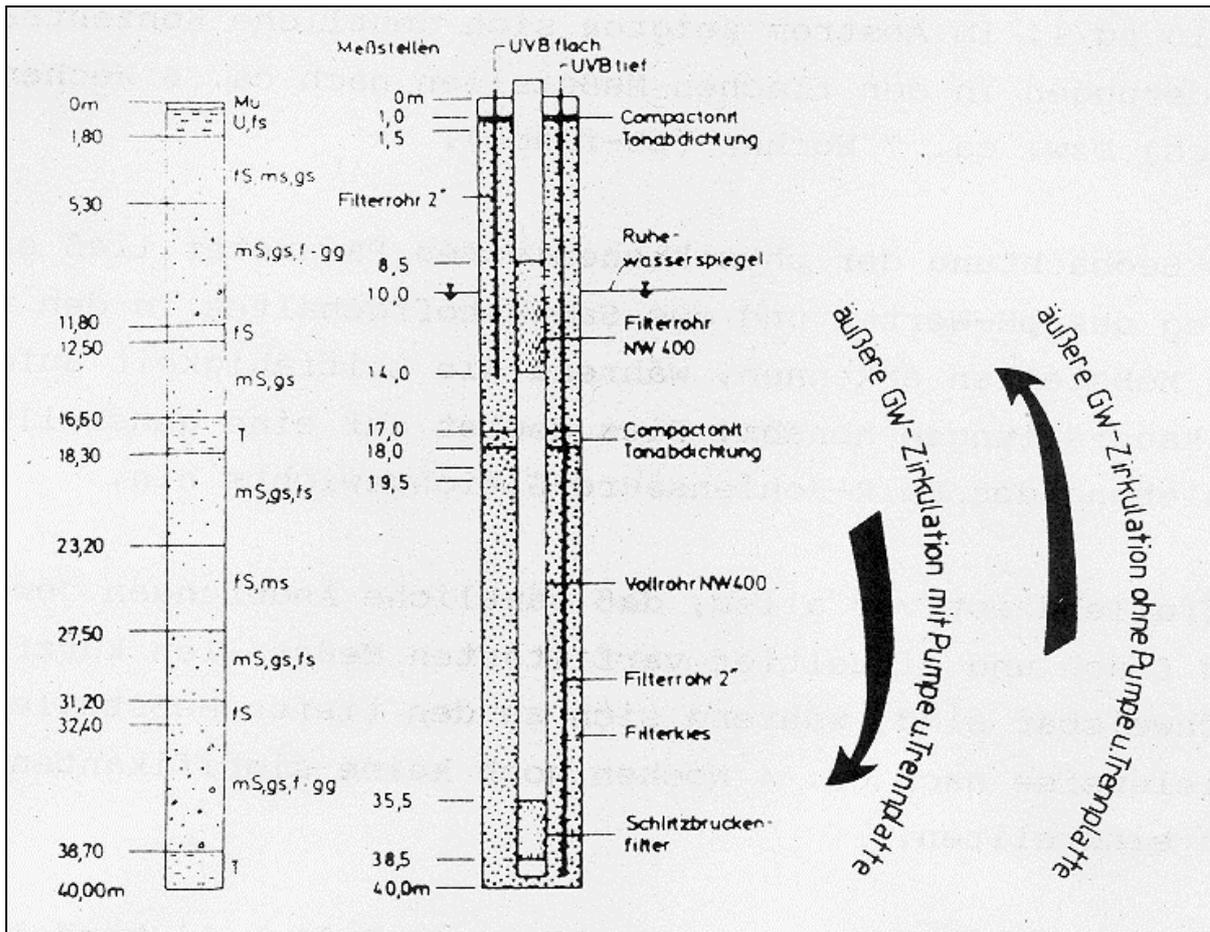
Die Beobachtung der physikochemischen Parameter ließ einen Anstieg des pH-Wertes und des Sauerstoffgehaltes in den umliegenden Meßstellen erkennen, während die Leitfähigkeit aufgrund von Kalkausfällungen abnahm. Dies deutet auf eine generelle Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts hin.

Auffallend ist vor allem, daß sämtliche Änderungen jeweils an den flach und mitteltief verfilterten Meßstellen kurzfristig nachweisbar sind, während sich an den tiefen Meßstellen beispielsweise nach ca. 4 Wochen noch keine signifikanten Änderungen einstellten.

Im Fall Mannheim-Käfertal (Fall L4 in Anlage 1) handelt es sich ebenfalls um einen Testbrunnen in der Fahne einer Grundwasser-Kontamination. Das im Bereich des Sanierungsbrunnens angeordnete Meßnetz ist jedoch als unzureichend zu bezeichnen. Es gibt nur eine tiefe Meßstelle im Brunnen und 3 flache Meßstellen im Abstrom sowie noch eine flache Meßstelle im Brunnen. Das in Abbildung 3.1 dargestellte geologische Profil läßt erkennen, daß in einer Tiefe von 16,50 m unter Gelände eine 1,80 m dicke Tonschicht ansteht. Wegen einer

unzureichenden Vorerkundung ist nicht eindeutig bestimmbar, ob es sich um eine Tonlinse oder um eine Tonschicht handelt. Handelt es sich um eine Tonlinse, könnten die aufgrund entsprechender Modellinformationen (Anlage 2, Fall 5) getroffenen Aussagen zutreffen.

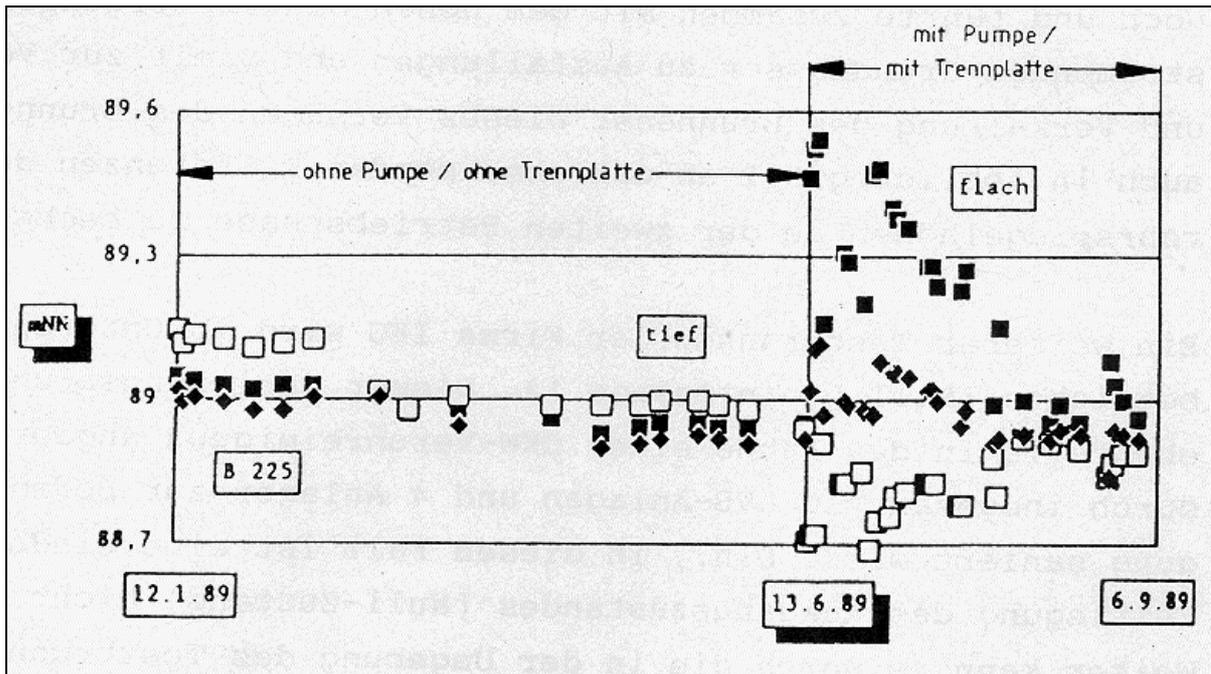
Der Sanierungsbrunnen wurde zu Beginn nach dem in Abschnitt 2 beschriebenen Prinzip des Air-Lift-Effektes betrieben. Aus den gemessenen Grundwasserständen läßt sich ableiten, daß in dieser Sanierungsphase die äußere Zirkulationsströmung von der unteren Verfilterung zur oberen Verfilterung verlief. D.h. in diesem Fall verlief die äußere Grundwasser-Zirkulationsströmung umgekehrt zum Standardfall, wie er in Abschnitt 2.1 beschrieben ist.



**Abb. 3.1:** Ausbau und geologisches Profil des UVB in Mannheim-Käfertal (Fall L4 in Anlage 1) (nach /15/)

Da der Brunnen in dieser Phase ohne Trennplatte betrieben wurde, muß eine Zirkulationsströmung innerhalb des Brunnens stattfinden, damit das abgereinigte Wasser innerhalb des Brunnens nach unten fließen und dort austreten kann.

Die in Abbildung 3.2 aufgetragenen Standrohrspiegelhöhen im Sanierungsbrunnen (Rechtecke: offen für tiefe Meßstelle, ausgefüllt für flache Meßstelle) und der abstromseits in einer Entfernung von 15,3 m liegenden flachen Meßstelle B225 (ausgefüllte Raute in Abbildung 3.2) zeigen in diesem ersten Testlauf geringfügig höhere Standrohrspiegelhöhen in der tiefen Meßstelle des Sanierungsbrunnens gegenüber den flachen Meßstellen (ca. 5 bis 10 cm). Dabei unterscheiden sich die Standrohrspiegelhöhen in den flachen Meßstellen nur unwesentlich.



**Abb. 3.2:** Gemessene Standrohrspiegelhöhen am UVB-Standort Mannheim-Käfertal (Fall L4 in Anlage 1) (nach /15/)

Nachdem eine Trennplatte und zur Verstärkung der Zirkulation eine Pumpe eingebaut wurde, kehrte sich die Zirkulationsströmung um (siehe Abb. 3.1). In diesem Zeitraum (nach dem 13.06.1989) liegen kurzzeitig die Standrohrspiegelhöhen (siehe Abbildung 3.2) der flachen Meßstelle im Sanierungsbrunnen deutlich über denen der tiefen Meßstelle (bis zu ca. 80 cm). Da die Standrohrspiegelhöhen in der Meßstelle B225 in dieser Phase ebenfalls leicht erhöht waren, kann geschlossen werden, daß sich die Grundwasser-Zirkulationswalze mindestens bis zu dieser Meßstelle auswirkte.

Die Änderung der Zirkulationsströmung läßt sich ebenfalls sehr gut an der Konzentrationsverteilung in der unteren und oberen Meßstelle im Sanierungsbrunnen erkennen. Bei diesem Sanierungsbrunnen traten Verkalkungen und Verockerungen auf, die auf eine Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts und eine Sauerstoffsättigung des zirkulierenden Grundwassers hinter der Strippzone zurückzuführen sind, wie eine Wasseranalyse ergab. Der Eisen- und Mangangehalt war in diesem Sanierungsfall relativ hoch und führte zusammen mit dem hohen Sauerstoffgehalt im ausströmenden Grundwasser zu Ausfällungen und damit zur Verockerung und Verkalkung des Brunnens. Dieses Versagen des Brunnens ist auch in Abbildung 3.2 an den abnehmenden Differenzen der Standrohrspiegelhöhen in der zweiten Betriebsphase zu beobachten.

Ein weiterer Testbrunnen der Firma IEG wird in Untersulmetingen betrieben (Fall L7 in Anlage 1). Dieser Sanierungsbrunnen ist ebenfalls in der Fahne einer CKW-Verunreinigung angeordnet, die durch insgesamt 10 UVB-Anlagen und 4 Anlagen zur Bodenluftabsaugung saniert wird. D.h., in diesem Fall ist eine eindeutige Festlegung des Ausgangszustandes (Null-Zustand) nicht möglich. Weiter kann es durch die in der Umgebung des Testbrunnens betriebenen Sanierungsmaßnahmen zu einer Überlagerung verschiedenster Einflüsse kommen. Diese Randbedingungen sind bei der Beurteilung dieses Anwendungsfalles unbedingt zu berücksichtigen. Die Auswertung verschiedener Tracer-Versuche (z.B. /22/) ergab ein recht unter-

schiedliches Bild, was zum einen auf die Randbedingungen (undichte Trennplatte, Frostperiode) als auch auf den Betrieb des UVB's zurückzuführen ist (der UVB mußte während eines Markierungsversuches für ca. 23 h abgeschaltet werden). Weiter ist bei der Interpretation der Ergebnisse dieses Sanierungsbrunnens zu beachten, daß infolge einer Filterverockerung ein Teilsektor des Filters aufgedrückt wurde. Dadurch änderte sich die Durchlässigkeit des Untergrundes in diesem Bereich und ein Großteil der Zirkulationsströmung des UVB's verläuft vermutlich infolge des geringeren Fließwiderstandes über diesen verfüllten Bereich bzw. durch eine möglicherweise in diesem Bereich liegende geologische Rinne. Dies kann auch aus den in Abbildung 3.3 dargestellten Wasserspiegellagen in den flachen und tiefen Meßstellen abgeleitet werden. Hier ist ein deutliches Abfallen des Grundwasserspiegels im vorderen Bereich der Darstellung zu beobachten. Im Zustrom des UVB ist in den flachen Meßstellen ein Anstieg und in den tiefen Meßstellen ein Absinken der Grundwasserstände zu verzeichnen, wogegen sich die Meßstellen im Abstrom genau umgekehrt verhalten.



## 4. Modellmässige Untersuchung von Standardfällen

### 4.1 Allgemeines

Die grundlegenden hydraulischen Vorgänge innerhalb und vor allem im umgebenden Untergrundbereich eines GZB sind infolge vielfältiger Überlagerung maßgebender Einflußparameter als äußerst komplex anzusprechen. Diese Komplexität wird im praktischen Einzelfall noch wesentlich verstärkt durch die orts- und bereichsspezifisch uneinheitlichen Untergrundbedingungen und durch die ebenfalls vielfältig variierenden Situationen bei Art, Umfang und Veränderung der Untergrundkontamination sowie durch den üblicherweise in Struktur, zeitlichem Ablauf und Kontrollmaßnahmen sehr variablen Betrieb der Sanierungsdurchführung.

Aufgrund dieser durchaus als praxisüblich anzusprechenden Verhältnisse ist es nahezu unmöglich, durch alleinigen Nachvollzug von bisher erfolgten Sanierungsmaßnahmen mit dem GZB-Verfahren eindeutige und allgemeingültige Folgerungen auf die Wirkungen und die Einsetzbarkeit des Verfahrens zu erhalten.

Dies war offensichtlich schon seit den ersten Anwendungen und der daraus feststellbaren Unmöglichkeit systematischer Beurteilbarkeit und Übertragbarkeit erkannt worden. Deshalb beschäftigten sich erfahrene Wissenschaftler mit einer Erfassung der grundlegenden hydraulischen Erscheinungen bei diesem Verfahren unter Standardbedingungen. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in vielfältigen Veröffentlichungen (siehe z.B. Verzeichnis der verwendeten Schriften) ausführlich in Beschreibungen und Diagrammen wiedergegeben und diskutiert. Hier soll und kann demgemäß kein Nachvollzug dieser Untersuchungen vorgenommen werden.

Vielmehr ist die Aufgabe eine Herausarbeitung praxisgerechter Kriterien und Beurteilungsmöglichkeiten für die Einsatzbedingungen des Verfahrens und seiner Sanierungswirkung unter naturgegebenen Bedingungen. Dabei zeigen sich einige maßgebende Schwierigkeiten:

- Die bisher durchgeführten Sanierungsfälle sind hinsichtlich der Ausgangs- und Ablaufbedingungen nur lückenhaft dokumentiert und von sehr vielen praktisch aufgetretenen Störungen und Abweichungen beeinflusst. Dadurch ist selbst im Einzelfall ein eindeutiger Nachvollzug und eine klare Einordnung von festgestellten Fakten nur schwer möglich. Erst recht scheidet aber ein Vergleich verschiedener Fälle wegen der nicht ausreichend bekannten vielfältig unterschiedlichen Orts- und Betriebsbedingungen.
- Die in der Natur gegebenen Verhältnisse sind im allgemeinen sowohl was die hydrogeologischen Untergrundbedingungen betrifft als auch hinsichtlich der Art, der Verteilung und des Umfanges der Kontamination außerordentlich standortabhängig. Ihre ausreichend detaillierte Erkundung für ein entsprechend komplexes Verfahren, wie es der GZB darstellt, ist nur mit einem erhöhten Erkundungsaufwand zu erreichen. So stellen auch die vorliegenden Praxisfälle immer nur Teildokumentationen bestimmter festgestellter Fakten dar, die einer Gesamtbeurteilung und einem Vergleich mit anderen Fällen aber kaum zugänglich sind. Schon gar nicht können sie allgemeingültige Hinweise für einen anderweitigen Einsatz des GZB-Verfahrens liefern.

- Die veröffentlichten Ergebnisse systematischer Modelluntersuchungen erforderten schon im Grundfall für eine überschaubare Wiedergabe der komplexen Strömungs- und Betriebsbedingungen eine Darstellung in dimensionslosen Diagrammen. Dies hat einen gewissen Nachteil in der geringeren Anschaulichkeit beim Vergleich mit praktischen Fällen. Andererseits aber wurde bisher darauf verzichtet, auch Uneinheitlichkeiten im Untergrundaufbau, wie sie in der Praxis fast immer vorkommen, wenigstens in standardisierter Form darzustellen.

Aufgrund dieser Tatsachen wurde in der vorliegenden Bearbeitung eine weitergehende Veranschaulichung der grundwasserhydraulischen Bedingungen im Bereich eines GZB versucht.

Obwohl die natürlichen Bedingungen mit einfachen Modellansätzen nicht simuliert werden können, war es möglich, zusätzliche Einflüsse einer praktisch häufig vorkommenden schwach ausgebildeten Untergrundschiebung in standardisierter Weise zu untersuchen. Dabei geht es vor allem um die grundsätzliche Feststellung von deren genereller Einflußmöglichkeit im Vergleich zum einheitlichen Grundfall.

Weiterhin ist anzumerken, daß es hier nicht als notwendig angesehen wurde, ein naturnäheres, echt dreidimensionales Modellsystem anzuwenden. Dies hätte allerdings trotz erheblich größeren Aufwandes dann einen Sinn, wenn zuverlässig und detailliert erfaßte Naturbedingungen dargestellt und gegebenenfalls als Grundlage für eine sachgerechte Sanierungsplanung verwendet werden könnten.

Im vorliegenden Fall wurde entsprechend den bisherigen Untersuchungen mit einem radial-symmetrischen Grundmodell gearbeitet, dessen Ergebnisse durch Überlagerung mit einer gleichmäßigen Grundwasserströmung auf räumliche Verhältnisse umgesetzt und entsprechend veranschaulicht werden können. Von besonderer Bedeutung hierbei war es, diese Untersuchungen mit einem sehr einfachen Modellsystem vorzunehmen, das auf jedem leistungsfähigen Personalcomputer einsetzbar ist. Diese Bedingungen erfüllte das für jeden äußerst preisgünstig erwerbbar Rechensystem ASM von Kinzelbach/Rausch /24/, für das auch häufig wiederholte Einführungskurse angeboten werden.

Eine ausführlichere Darstellung des Modellaufbaues, der Untersuchungsvarianten und ihrer Detailergebnisse ist in der Anlage 2 gegeben. Hier sollen nur in kurzer Zusammenfassung einige maßgebende Hauptergebnisse zusammengestellt und diskutiert werden.

## 4.2 Untersuchte Fälle - Hauptergebnisse

Untersucht wurden sechs Standardfälle mit Variation der Untergrundbedingungen im Wirkungsbereich eines GZB. Dabei wurden jeweils einheitliche Bedingungen am Brunnen mit Filterstrecken im oberen und unteren Bereich der jeweiligen Länge  $a = 0,28 H$  gewählt, zwischen denen ein geschlossener Abschnitt von einer Höhe  $b = 0,44 H$  lag. Dabei stellt  $H$  die Gesamtmächtigkeit des erfaßten gespannten Grundwasserleiters dar.

Grundsätzlich wurde von einer generellen Untergrunddurchlässigkeit von  $k_f = 0,001 \text{ m/s}$  in horizontaler Richtung ausgegangen. In einer ersten Variation wurde ein isotroper Fall, bei dem diese Durchlässigkeit in allen Richtungen gilt, einem anisotropen Fall mit einer fünffach verringerten Vertikaldurchlässigkeit  $k_v$  gegenübergestellt ( $k_H = 5 k_v$ ).

Weitere Varianten betrafen das zusätzliche Auftreten einer durchgehenden dichteren horizontalen Zwischenschicht der Stärke  $d = 0,22 H$  mit einer 10-fach verringerten Durchlässigkeit.

Als letzte Variante wurde eine nur im Bereich des Brunnens vorliegende dichtere horizontale Linse der Stärke  $d = 0,22 H$  mit einer radialen Ausdehnung bis  $R = 2 H$  und einer 100-fach verringerten Durchlässigkeit gegenüber dem übrigen Untergrund betrachtet.

Als zusätzliche hydrologisch-betriebstechnische Variationen wurden unterschiedlich hohe Gesamtwasserdurchsätze im Brunnen sowie eine unterschiedlich ausgeprägte überlagernde weiträumige Grundwasserströmung zugrundegelegt.

Auf Tafel 4.1 sind sämtliche Untersuchungsfälle mit ihren Hauptkriterien zusammengestellt. Außerdem sind darin die jeweiligen Darstellungen der Strömungsbilder in Anlage 2 aufgeführt und als ein Hauptergebnis der jeweils ermittelte Staupunkt Abstand vom Brunnen im Zustrombereich angegeben. Dieser Abstand hat eine maßgebende Bedeutung für die Wirkung des GZB, da er die Grenze zwischen Grundwasserzustrom zum Brunnen und Zirkulationsströmung zwischen oberem und unterem Filterbereich markiert. Je weiter stromaufwärts der Staupunkt wandert, desto stärker ist der Einfluß der Zirkulationsströmung auf den Gesamtdurchsatz des Brunnens gegenüber der Erfassung von Grundwasserzustromanteilen. Allerdings sind dazu gewisse Einschränkungen beim Vorliegen einer Untergrundsichtung zu machen, da hierbei unter Umständen der Staupunkt Abstand nicht für die Gesamtaufnahme von Grundwasserzustrom sondern nur für den Einfluß oberhalb einer Zwischenschicht maßgebend ist.

Tafel 4.1: Zusammenstellung der Untersuchungsfälle

Fall	Charakteristiken	Brunnen- durchsatz m <sup>3</sup> /h	überlagerte Grundwasser- strömung mit vf (m/d)	ermittelter Staupunkt- abstand S / H	Ergebnis- darstel- lung in Anlage 2
1 a	homogener,	24,35	-	-	Abb. 4
b	isotroper	24,35	0,86	0,83	
c	GW-Leiter	114,45	-	-	
d		114,45	0,86	1,15	
2 a	homogener,	24,35	-	-	Abb. 5
b	anisotroper	24,35	0,30	1,92	
c	GW-Leiter ( $k_H = 5 k_V$ )	24,35	0,86	1,37	
2 d	homogener,	46,66	-	-	Abb. 6
e	anisotroper	46,66	0,30	2,28	
f	GW-Leiter ( $k_H = 5 k_V$ )	46,66	0,86	1,70	
3 a	isotrop, aber	24,30	-	-	Abb. 7
b	durchgehende	24,30	0,30	1,78	
c	Zwischenschicht. Dicke: 0,22 H $k_H' = 0,1 k_H$	24,30	0,86	1,21	
3 d	isotrop, aber	46,60	-	-	Abb. 8
e	durchgehende	46,60	0,30	2,13	
f	Zwischenschicht. Dicke: 0,22 H $k_H' = 0,1 k_H$	46,60	0,86	1,57	
4 a	anisotrop	24,30	-	-	Abb. 9
b	$k_H = 5 k_V$	24,30	0,30	3,20	
c	und durchgehende Zwischenschicht Dicke: 0,22 H $k_H' = 0,1 k_H$	24,30	0,86	1,91	
5 a	isotrop, aber im	24,30	-	-	Abb. 10
b	Zentralbereich	24,30	0,30	2,35	
c	dichtere Linse. Dicke: 0,22 H Ausdehnung: 2 H $k_H' = 0,11 k_H$	24,30	0,86	2,02	
6 a	anisotrop, aber im	24,30	-	-	Abb.11
b	Zentralbereich	24,30	0,30	2,94	
c	dichtere Linse. Dicke: 0,22 H Ausdehnung: 2 H $k_H' = 0,11 k_H$	24,30	0,86	2,23	

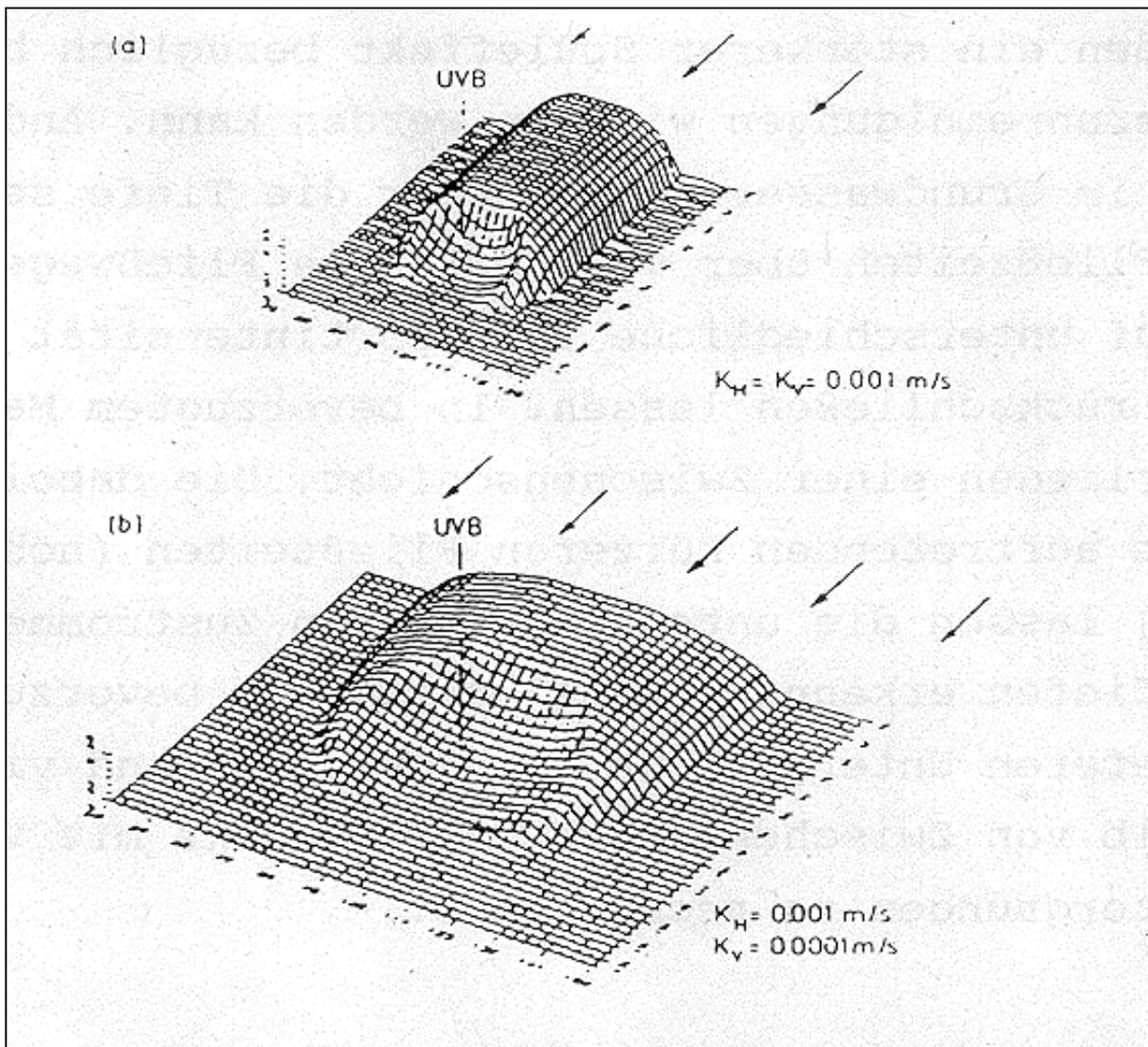
Ein Blick auf die Strömungskonstellationen in den aufgeführten Abbildungen des oberstromigen Zentrallängsschnittes in Anlage 2 läßt außerdem erhebliche Unterschiede bei den verschiedenen Situationen erkennen, die für die Effektivität des GZB wesentlich sein können.

So fallen beispielsweise die sehr unterschiedlichen Fließwege und Fließzeiten in verschiedenen Teilbereichen der Zirkulationsströmung auf. Charakteristisch ist dabei, daß meist nur in unmittelbarer Brunnennähe und für einen begrenzten Anteil der Zirkulationsströmung kurze Fließzeiten vorliegen, bei denen unter Umständen ein stärkerer Spüleffekt bezüglich brunnen-naher Untergrundverunreinigungen wirksam werden kann. Andererseits sind auch beim Grundwasserzuström über die Tiefe sehr unterschiedliche Fließzeiten über vergleichbare Fließwege zu erkennen, die auch auf unterschiedliche Transportintensität von Schadstoffanteilen rückschließen lassen. In bevorzugtem Maß gilt dies auch bei Vorliegen einer Zwischenschicht. Die dabei unterhalb der Schicht auftretenden kürzeren Fließzeiten (höhere Geschwindigkeiten) lassen die unterschiedlichen Zustrommengen in verschiedenen Tiefen erkennen. Dabei tritt ein bevorzugter Zufluß aus dem tieferen Untergrundbereich auf, während vielfach gerade oberhalb von Zwischenschichten verstärkt mit Verunreinigungen des Untergrundes zu rechnen ist.

### **4.3 Weitergehende Auswertungen und Überlegungen**

Bei den dargestellten Zustromverhältnissen unter verschiedenen Bedingungen ist grundsätzlich zu berücksichtigen, daß sie jeweils nur ein Längsschnitt durch den Brunnen sind, der nur Konturen der tatsächlichen komplexen räumlichen Strömung wiedergibt. Dies gilt ebenfalls für die in Anlage 2, Abbildung 12 beispielhaft dargestellten Längsschnitte im Zu- und Abstrom des Brunnens.

Zur Feststellung von maßgebenden Grenzbedingungen für den räumlichen Brunnenzustrom eignet sich besonders eine Darstellung der Strömungsverteilung über die horizontale untere Begrenzung des Grundwasserleiters. Da auf dieser Sohlschicht nur horizontale Strömung möglich ist, gibt die Erfassung der Fließkonturen hier die tatsächlichen Geschwindigkeiten und Strömungsrichtungen wieder. Die daraus erkennbare Zustrombreite zum Brunnen muß außerdem die maximal erfaßte Breite sein, die beim GZB in geringeren Tiefen auf jeden Fall schmaler und an der Oberkante des Grundwasserleiters ein Minimum wird (siehe Abb. 4.1).



**Abb. 4.1:** Abgrenzung des Zustrombereiches zu einem GZB im natürlichen Grundwasserstrom mit und ohne Anisotropie der Untergrunddurchlässigkeit (aus /18/)

Für die Feststellung der maximalen Einzugsbreite eines GZB an der Sohle des Grundwasserleiters wurde in Anlage 2, Abbildung 13 die Strömungsverteilung auf die Sohlenschicht für den Ausgangsfall des Brunnens im homogenen, isotropen Untergrund (Fall 1 b) auf Tafel 4.1 dargestellt. In diesem Fall wird vom Brunnen bei einem relativ geringen Gesamtdurchsatz von  $24,35 \text{ m}^3/\text{h}$  und bei einer natürlichen Grundwasserströmung mit einer Filtergeschwindigkeit von  $0,86 \text{ m/d}$  nur ein relativ schmaler Zuflußstreifen von der Breite  $B_B = 2,5 H$  erfaßt. Eine Überprüfung der entsprechenden Zustrombreite  $B_T$  an der Oberkante des Grundwasserleiters (aus dem Strömungsbild) ergibt einen Wert von  $B_T = 1,15 H$ . Dies macht erkennbar, daß in diesem Fall nur eine Zustromfläche von rd.  $(1,15 H + 2,5 H)/2 \cdot H = 1,825 H^2$  vom Brunnen erfaßt wird. Bei den zugrundeliegenden geometrischen Systemgrößen von  $H = 9 \text{ m}$  und  $v_{fg} = 0,86 \text{ m/d}$  bedeutet dies einen Zuflußanteil am Brunnendurchsatz von rd.  $5,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , das sind etwa 22 % des Gesamtdurchsatzes des Brunnens. Der restliche Anteil von rd. 78 % entfällt somit in diesem Fall auf die Kreislaufströmung.

In dem wesentlich anders gearteten Fall 6 c), bei dem außer einer Gesamtanisotropie des Grundwasserleiters von  $k_H = 5 k_V$  noch im Nahbereich des GZB eine dichtere Linse im Grundwasserleiter vorausgesetzt wurde, ergeben sich auch deutlich andere Zustromverhältnisse. In Abbildung 14 der Anlage 2 ist für diesen Fall sowohl der Längsschnitt durch den Brunnen als auch die Strömungsverteilung auf der Sohlschicht wiedergegeben. Hier beträgt die maximale Einzugsbreite des Brunnens an der Sohle des Grundwasserleiters rd.  $BB = 6,9 H$ . Aus dem Strömungsbild an der Oberkante des Grundwasserleiters ergibt sich dagegen eine erfaßte obere Zustrombreite von  $B_T = 2,0 H$ .

Daraus errechnet sich wiederum eine näherungsweise mittlere Zustromfläche von  $(2,0 H + 6,9 H)/2 \cdot H = 4,45 H^2$ . Dies ergibt bei den gegebenen Bedingungen einen Zustromanteil im Brunnen von  $Q_z = 4,45 \cdot 81 \cdot 0,86/24 = 12,92 \text{ m}^3/\text{h}$ . Das sind rd. 53 % des Gesamtdurchsatzes des Brunnens. Andererseits ergibt sich auch die Abweichung aus einer Ermittlung der Größen  $B_B$  und  $B_T$  für den einfacheren anisotropen Fall ohne dichtere Linse aus dem Diagramm in Abb. 11 a) in /18/. Darin ergibt sich für ein  $Q/(H^2 \cdot v) = 24,30 \times 24 / (81 \cdot 0,86) = 8,37$  bei  $k_H/k_V = 5$  ein  $B_B/H \sim 4,5$  und ein  $B_T/H \sim 1$ . Das bedeutet wiederum einen erfaßten Zustrom von rd.  $(1 H + 4,5 H) / 2 \cdot H \cdot 0,86/24 = 8,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , der wesentlich geringer ist als beim Vorliegen einer dichteren Linse im Umkreis des Brunnens.

Man erkennt aus dieser Vergleichsbetrachtung die mögliche Bedeutung einer Anomalie im Untergundaufbau, die in diesem Fall zu einem deutlich höheren Wirkungsgrad des GZB führen kann, während in anderen Fällen auch ungünstigere Auswirkungen denkbar sind.

## 5. Empfehlungen für den Anwender von Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB)

Aufgrund der beschriebenen Auswirkungen der Grundwasser-Zirkulationsströmung und vor allem auch wegen der Einflüsse der jeweiligen standortspezifischen Untergrundbedingungen sind für die Planung und den sachgerechten Einsatz eines solchen Brunnens auf jeden Fall eingehende Erkundungen und umfangreiche Überwachungsmaßnahmen erforderlich. Diese müssen gerade wegen der Komplexität dieses Verfahrens und der auftretenden Wirkungen über das übliche Maß von Erkundungs- und Kontrollmaßnahmen bei Grundwassersanierungen hinausgehen, um ausreichende Grundlagen für eine sichere Beurteilung der Effektivität des Verfahrens und seine zielgerechte Steuerung und Kontrolle zu haben. Bei der nachfolgenden Aufstellung notwendiger Erkundungs- und Überwachungsmaßnahmen beim Einsatz von GZB's sind dementsprechend die auch bei anderen Sanierungsverfahren erforderlichen Einrichtungen und Maßnahmen eingeschlossen, d.h. daß zumindest ein Teil der Erkundungen und Meßeinrichtungen in jedem Sanierungsfall als notwendig und verbindlich anzusehen ist. Allerdings erfordern die komplexen Strömungsvorgänge im Umfeld eines GZB zur Zeit noch darüber hinausgehende Untersuchungen und Kontrollen, um einen gesicherten Ablauf der Sanierung zu gewährleisten. In Anlage 3 ist zur Verdeutlichung der allgemeingültigen Erkundungsmaßnahmen für eine Grundwassersanierung eine Zusammenstellung maßgebender Anforderungen (aus /8/) erfolgt. Aus der Praxis von Sanierungen und anhand der in Abschnitt 3 beschriebenen Anwendungsfälle ist allerdings erkennbar, daß häufig wichtige Grundinformationen fehlen bzw. unzureichend dokumentiert werden.

### 5.1 Erkundungsmaßnahmen

Vor Beginn jeder Sanierung ist eine sorgfältige und zielgerichtete Erkundung des Grundwasserschadensfalles durchzuführen. Hierzu gehören neben einer detaillierten Beschreibung der Schadensursache und der in Boden und Grundwasser gelangten Stoffe eine ausführliche Erkundung des anstehenden Untergrundes durch eine Reihe von Bohrungen und Sondierungen sowie eine eingehende Erfassung der hydrologischen und grundwasserhydraulischen Grössen.

Für die Ermittlung der geohydrologischen Bedingungen sind mindestens die folgenden Arbeiten durchzuführen:

- Von einem qualifizierten Gutachter ist eine geologisch-sedimentologische Bestandsaufnahme des Untergrundes zu erarbeiten.
- Bei der Erstellung der Hauptbohrung und möglichst auch bei den zusätzlichen Erkundungsbohrungen sind horizontierte Bohrproben zu entnehmen und sicherzustellen. Je nach Art der Kontamination ist das Bohrgut entsprechend zu behandeln. Die Bohrsprache muß durch einen qualifizierten Fachmann durchgeführt werden.
- Zusätzlich sollten in speziellen Fällen geophysikalische Bohr-locherkundungen und Messungen von der Oberfläche aus im Einzugsbereich der Sanierung erfolgen.
- Zur Ermittlung der wirksamen Durchlässigkeit der für die Sanierung maßgebenden Bodenschichten wäre zunächst ein Pumpversuch angebracht. Im Bereich einer Kontamination ist jedoch eine mögliche Mobilisierung von Schadstoffen nicht auszuschließen.

Daher sind örtlich verteilte tiefendifferenzierte Bohrlochtests mit geringem Wasseraustausch zur Bestimmung der hydraulischen Untergrundeigenschaften vorzuziehen.

- Um die Eigenschaften der anstehenden Sedimente hinsichtlich der verwendeten Sanierungstechnik beurteilen zu können, ist außer der örtlichen Verteilung der Durchlässigkeiten auch die Sorptionseigenschaft des Untergrundes gegenüber den anstehenden Schadstoffen zu untersuchen.

Die aufgeführten Erkundungsmaßnahmen beziehen sich nur auf den im Bereich der Sanierung anstehenden Untergrund und dessen Eigenschaften. Auf sie kann auf keinen Fall verzichtet werden, da eine Sanierungsmaßnahme nur dann Aussicht auf Erfolg hat, wenn die Verhältnisse im umgebenden Untergrund hinreichend bekannt und dokumentiert sind.

Vor jeder Sanierung einer Grundwasserverunreinigung sind weiterhin die Grundwasserverhältnisse und die Gebietseinflüsse eingehend zu erkunden. Dazu ist einerseits eine Erhebung der Oberflächenverhältnisse im Umfeld des Schadensfalles hinsichtlich Nutzung, Bewuchs und Gewässer durchzuführen. Andererseits sind die hydrologischen Bedingungen des Grundwasserhaushaltes in ihren zeitlichen und räumlichen Veränderungen mit wechselnden Wasserstands- und Abflußverhältnissen im Einzugsbereich anhand länger- und kurzzeitiger Beobachtungen und Auswertungen gründlich zu erfassen und zu dokumentieren.

Im näheren und weiteren Umfeld des vorgesehenen Brunnenstandortes sind unter Berücksichtigung der geologischen Erkundungsergebnisse unbedingt eine Reihe von Grundwassermeßstellen einzurichten, in denen in Abhängigkeit von den jeweiligen Untergrundbedingungen tiefendifferenzierte Messungen und Probenahmen möglich sind. Dabei muß, wie weiter unten noch ausgeführt wird, außer einer Erfassung des näheren Umfeldes des Standortes auch eine sichere Feststellung des Zu- und Abstromes unter wechselnden hydrologischen Bedingungen möglich sein.

Zum Erkundungsprogramm gehören weiterhin tiefendifferenzierte Wasserprobenahmen und die Bestimmung der Schadstoffgehalte vor Beginn der Sanierung. Die möglichst bei mindestens zwei verschiedenen Beprobungen ermittelten Schadstoff-Konzentrationen und physikochemischen Eigenschaften dienen der unbedingt erforderlichen Sicherstellung des Ausgangs- bzw. Nullzustandes, die gerade beim GZB-Einsatz wegen komplexer Sanierungseinwirkungen von ausschlaggebender Bedeutung ist. Dabei sollten zunächst mindestens die folgenden Größen ermittelt werden:

- schadensspezifische Wasserinhaltsstoffe
- DOC
- pH-Wert
- Leitfähigkeit
- Temperatur
- Sauerstoffgehalt
- CO<sub>2</sub>-Gehalt
- Grundwasserstand

Mit Wasserinhaltsstoffen sind dabei die vermuteten oder zu erwartenden Schadstoffe sowie andere charakteristische anorganische Stoffanteile, wie z.B. Nitrat, Ammonium, ggf. Sulfat/Sulfid, Eisen, Mangan, gemeint. Da die maßgebenden Stoffparameter von Fall zu Fall ver-

schieden sind, sind sie bei jeder Erkundung speziell festzulegen. Dabei ist grundsätzlich der Ausgangszustand auf ein größeres Spektrum an Stoffen zu untersuchen, damit das anstehende Stoffspektrum im Untergrund eindeutig belegt werden kann.

Auf jeden Fall ist zur Dokumentation des Ausgangszustandes eine umfassende Analyse des Grundwassers notwendig. Dies bedeutet z.B. bei einer Kontamination mit chlorierten Lösungsmitteln die Untersuchung des Grundwassers auf alle relevanten Chlor-Kohlenwasserstoffe bis hin zu Vinylchlorid. Hierbei sind Entwicklungen im Analysebereich zu berücksichtigen und neuere Analyseverfahren entsprechend anzuwenden.

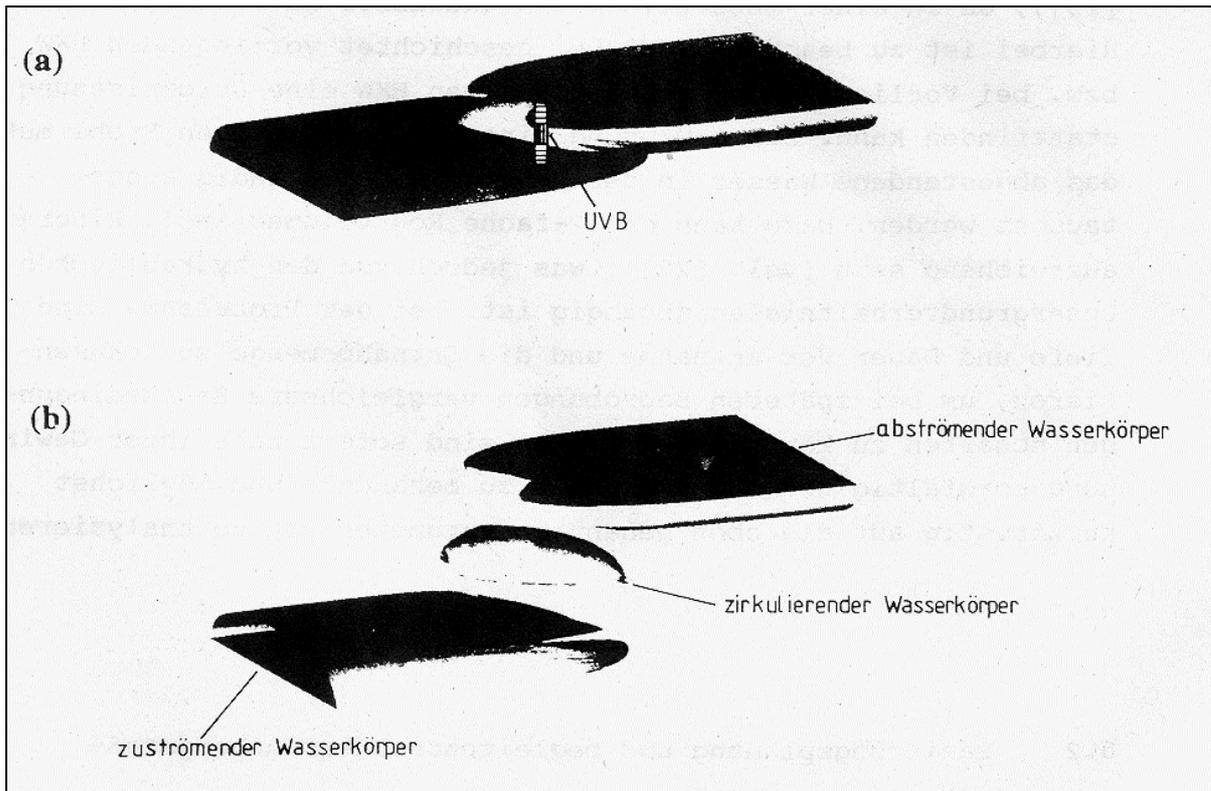
Da viele der oben genannten Größen in der Regel erst im Labor bestimmt werden können, kommt auch der Probenahmetechnik, der Lagerung und dem Transport wesentliche Bedeutung zu.

Wurde zur Bestimmung der Untergrunddurchlässigkeit ein Pumpversuch durchgeführt, ist bis zur Ermittlung des Nullzustandes für die Sanierung eine entsprechende Zeit abzuwarten. Durch den Pumpversuch und die damit notwendigerweise verbundene hydraulische Belastung des Untergrundes werden Schadstoffe mobilisiert und das Bodenmilieu zumindest bereichsweise verändert. Damit sich die Verhältnisse im Untergrund wieder auf einen Gleichgewichtszustand einstellen können, ist vor der Probenahme zur Festlegung des tatsächlichen Nullzustandes der Sanierungsmaßnahme bis zur Einstellung eines eventuell veränderten stationären Ausgangszustandes zu warten.

Die Probenahme soll grundsätzlich mit einer Pumpe erfolgen (vgl. /25/), da in einer Meßstelle mit Standwasser zu rechnen ist. Hierbei ist zu beachten, daß bei geschichtet vorliegenden HKW bzw. bei Vorliegen von freien flüssigen HKW eine Durchmischung stattfinden kann. Zur Gewinnung einer repräsentativen Probe muß das abgestandene Wasser in der Meßstelle vollständig ausgetauscht werden. Dazu kann das 2-fache Rohrvolumen incl. Ringraum ausreichend sein (vgl. /25/), was jedoch von den hydraulischen Untergrundverhältnissen abhängig ist. Bei der Probenahme sind Tiefe und Dauer der Entnahme und die Entnahmemenge zu dokumentieren, um bei späteren Beprobungen vergleichbare Randbedingungen schaffen zu können. Die Proben sind sofort nach ihrer Gewinnung sorgfältig und ordnungsgemäß zu behandeln und möglichst kurzfristig auf die oben genannten Parameter hin zu analysieren.

## **5.2 Sanierungsplanung und begleitende Untersuchungsmaßnahmen**

Im Gegensatz zu einer rein hydraulischen Maßnahme, bei der nur ein Zufluß zum Entnahmebrunnen stattfindet, tritt beim GZB sowohl eine Zu- als auch eine Abströmung im Bereich des Sanierungsbrunnens auf. Dadurch entsteht u.a. eine ausgeprägt von den anstehenden Untergrundverhältnissen und vom Brunnenbetrieb abhängige Zirkulationswalze. Je nach Grundwasserfließgeschwindigkeit dehnt sich diese Zirkulationswalze mehr oder weniger weit nach Ober- bzw. Unterstrom sowie seitlich vom Brunnen aus. Dadurch entsteht, wie bereits im Abschnitt 4 beschrieben, ein räumlich sehr komplexes und nur begrenzt sicher vorausbestimmbares Strömungsbild. In Abbildung 5.1 sind beispielhaft für ein solches Strömungsbild die sich unter einheitlichen Untergrundbedingungen ergebenden Trennstromflächen dargestellt.



**Abb. 5.1: Trennstromflächen der verschiedenen Wasserkörper in der Außenströmung eines GZB: Einzugsbereich, zirkulierender und nach unterstrom abfließender Wasserkörper, (a) tatsächliche Verhältnisse und (b) Wasserkörper zur Verdeutlichung auseinandergezogen (nach /18/)**

## Grundwasserüberwachungssystem

Bei der Sanierung einer Grundwasserkontamination unter Einsatz von GZB's sind zur Beweissicherung Dokumentation und Beurteilung unbedingt sachgerechte Meßeinrichtungen im Grundwasserbereich notwendig.

Beispielhaft ist in Abbildung 5.2 für einen fiktiven Schadensfall ein Vorschlag für ein allgemeines Grund-Netz von Grundwassermeßstellen zur Überwachung und Kontrolle dargestellt. Unmittelbar beim Zentrum des Grundwasserschadensfalles soll in diesem Fall ein GZB eingesetzt werden. Bei als bekannt vorausgesetzter momentaner oder mittlerer Grundwasserfließrichtung sollten im Oberstrombereich (möglichst oberhalb des Zirkulationsbereiches) verschiedene Meßstellen angeordnet werden, um auch zeitweise wechselnde Zustromrichtungen erfassen zu können. Sie dienen sowohl der laufenden Überprüfung des Grundwasserzustromes (hydrologische und grundwasserhydraulische Bedingungen) als auch der Feststellung der Stoffgehalte im zufließenden Grundwasser. Unter anderem ist damit die Wirkung im Oberstrom ankommender Verunreinigungen zu dokumentieren.

Da die Wirkung des GZB, wie oben beschrieben, nicht nur in Grundwasser-Fließrichtung erfolgt, sind auch seitlich der Hauptlängsachse durch den Brunnen Grundwassermeßstellen notwendig. Mit Hilfe dieser Meßstellen kann einerseits die seitliche Ausbreitung der Zirkulationsströmung kontrolliert werden, andererseits kann aber auch ein eventuelles Vorbeiströmen von nicht abgereinigtem Grundwasser frühzeitig festgestellt werden.

Im Abstrom des Brunnens sind nach Möglichkeit Meßstellen in verschiedenen Abständen bis in einen zumindest längerzeitig unbeeinflussten Bereich vorzusehen, die eine abströmende Fahne eindeutig erkennbar machen können. Schwierigkeiten bzw. ein notwendiger Aufwand bei der Anzahl von Meßstellen ergeben sich dabei aus der unter Umständen schmalen Abstromfahne aus dem Brunnen, die außerdem infolge hydrologischer Einflüsse Schwankungen in der Richtung aufweisen kann. Somit sind verschiedene Meßstellen jeweils auf Querschnitten im Abstrombereich einzurichten.

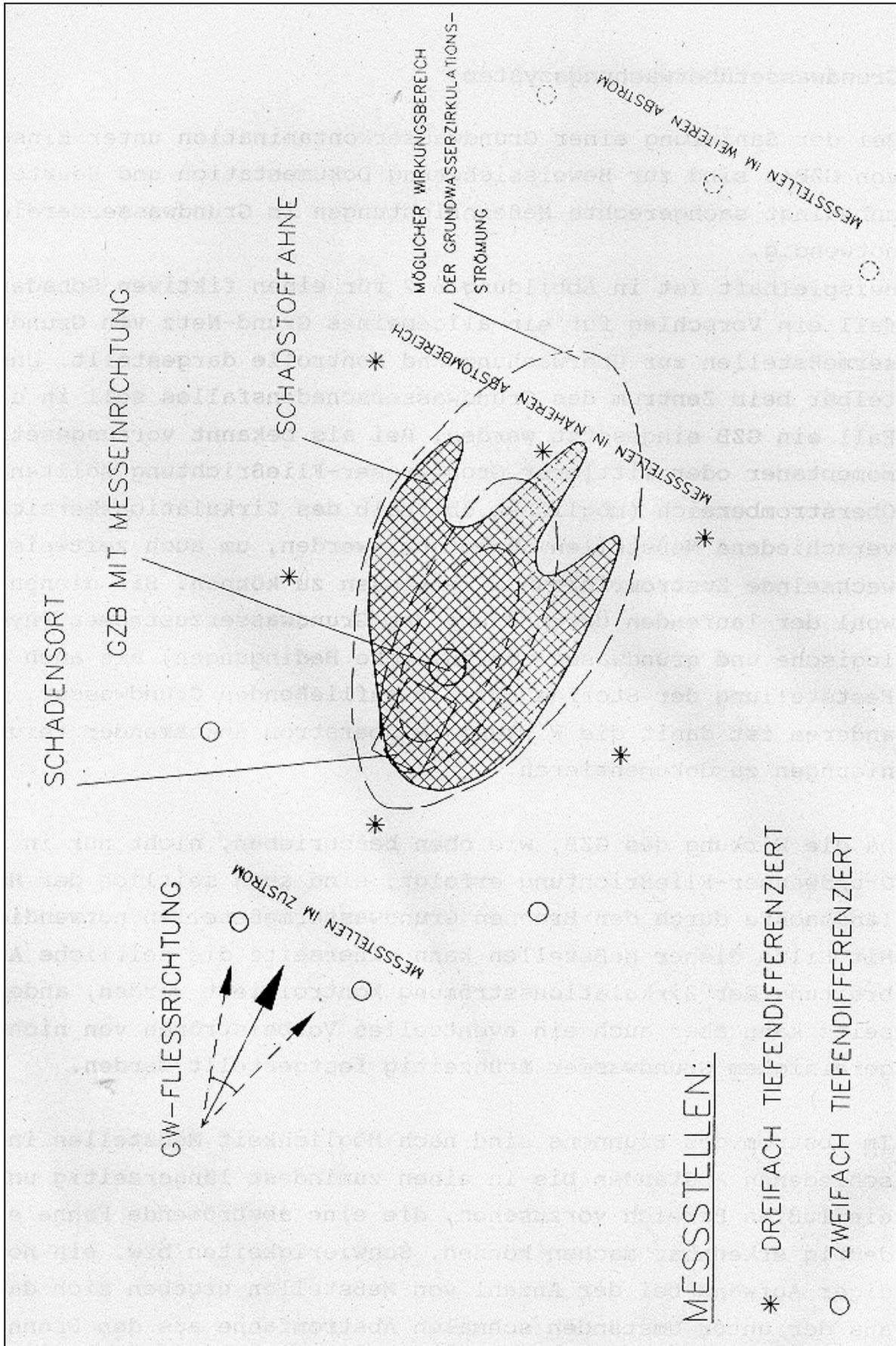


Abb. 5.2: Meßnetz-Vorschlag zur Überwachung und Kontrolle der Sanierung eines Grundwasserschadensfalles

Zur Unterscheidung der tiefenunterschiedlichen Grundwasserverhältnisse (vor allem auch wegen der dreidimensionalen Zirkulationswalze) sind die Meßstellen möglichst tiefendifferenziert (mindestens in zwei bis drei Tiefenbereichen) auszugestalten. Dabei ist unbedingt die Anordnung nebeneinander liegender getrennter Meßstellen für unterschiedliche Tiefen vorzuziehen, um einen sicheren Grundwasseraufschluß zu erhalten und den Grundwasser-Zirkulationsbereich abzugrenzen. Außerdem soll die Verfilterung jeweils nur einen begrenzten Tiefenbereich erfassen, um tatsächlich tiefendifferenzierte Bedingungen wiederzugeben.

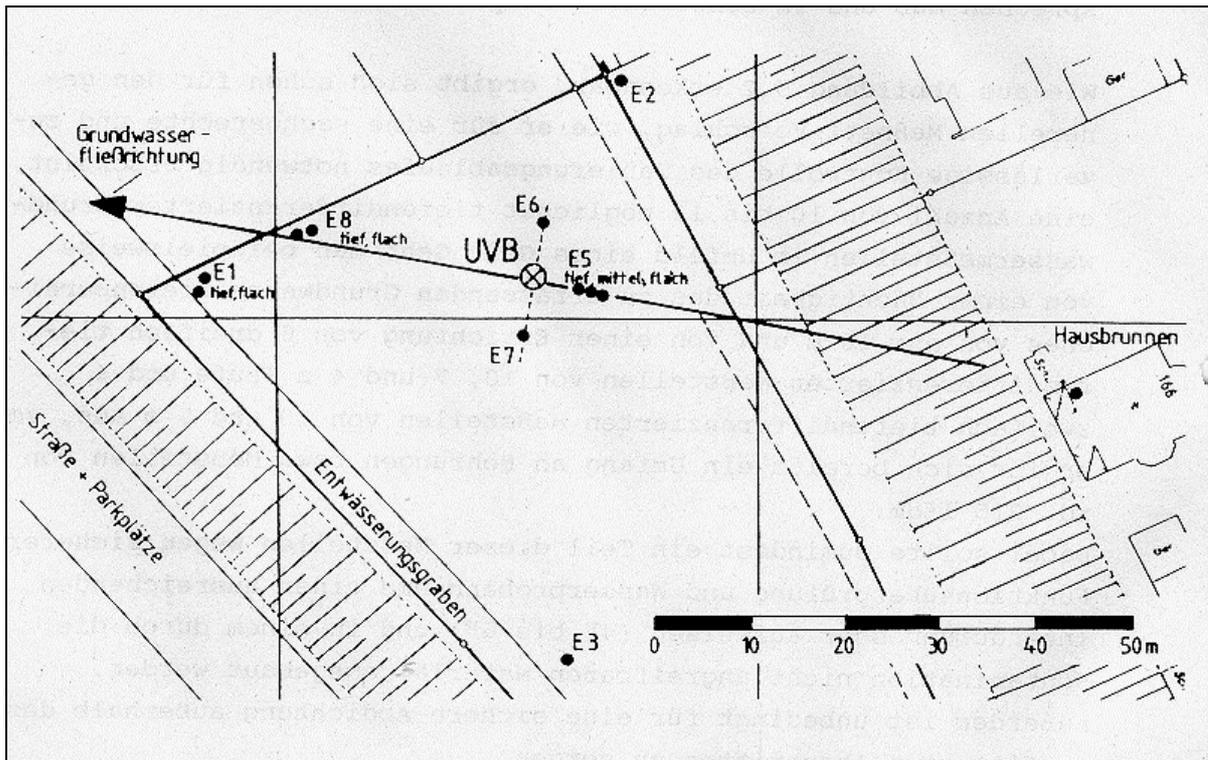
Die Anzahl und Anordnung der Meßstellen muß auf jeden Fall für den jeweiligen Schadensfall ein repräsentatives Bild ergeben, weshalb die Meßstellenanordnung und der Meßstellenausbau sowohl den geologischen Verhältnissen im Standortumfeld als auch den Kontaminationsbedingungen (Verteilung, Umfang, Transport) entsprechen muß und im Einzelfall entsprechend anzupassen ist.

Wie aus Abbildung 5.2 erkennbar, ergibt sich schon für den generellen Meßnetz-Vorschlag, wie er für eine sachgerechte und zuverlässige Kontrolle des Sanierungsablaufes notwendig erscheint, eine Anzahl von 10 bis 12 möglichst tiefendifferenzierter Grundwassermeßstellen im Umfeld eines GZB. Geht man beispielsweise von einer Mächtigkeit des zu erfassenden Grundwassertiefenbereiches von nur 10 m und von einer Errichtung von 6 dreifach tiefendifferenzierten Meßstellen von 10, 7 und 4 m Teufe und 6 zweifach tiefendifferenzierten Meßstellen von 10 und 5 m aus, so ergibt sich bereits ein Umfang an Bohrungen bzw. Meßstellen von rd. 215 lfdm.

Dabei sollte zumindest ein Teil dieser Meßstellen wegen sicherer Funktionsüberprüfung und Wasserprobennahme einen ausreichenden Innendurchmesser aufweisen (4" bis 6") und in einem durch die Kontamination nicht angreifbaren Material ausgebaut werden. Außerdem ist unbedingt für eine sichere Abdichtung außerhalb des verfilterten Abschnittes zu sorgen.

Bei Einrichtung einer entsprechend großen Anzahl von Meßstellen im Nahbereich des Brunnens ist andererseits zur Vermeidung grosser Wassermengenentnahmen für Analysen zum Teil auch die Verwendung geringerer Meßstellendurchmesser vorteilhaft, wobei aber unbedingt noch eine zuverlässige Probennahme zu gewährleisten ist.

Für einen praktischen Anwendungsfall in der Fahne einer Grundwasserkontamination ist in Abbildung 5.3 das vorhandene Meßnetz im näheren Umfeld des Sanierungsbrunnens dargestellt (siehe hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 3 zum Anwendungsfall Karlsruhe-Knielingen). Die örtlichen Randbedingungen ließen allerdings in diesem Fall keine weiteren Meßstellen im Zustrom sowie im Abstrom zu, weshalb dieser Fall nur eingeschränkt als repräsentativ angesehen werden kann.



**Abb. 5.3:** Ausführung eines Meßnetzes für einen praktischen Fall (Karlsruhe-Knielingen, Unterlagen wurden von Herrn Bürmann, Universität Karlsruhe, zur Verfügung gestellt)

## Brunnen

Bei Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB) handelt es sich um ein spezielles hydraulisches Sanierungsverfahren, bei dem Entnahme und Infiltration im gleichen Bohrloch stattfindet. Von daher könnte ein GZB wie ein herkömmlicher hydraulischer Brunnen dimensioniert werden. Da jedoch gleichzeitig eine Stripfung leichtflüchtiger Stoffe stattfindet und für die Strip-Einheit in der Regel nur ein begrenztes Volumen zur Verfügung steht, kann bei ausreichender Leistungsfähigkeit des Grundwasserleiters die Strip-Einheit der limitierende Faktor sein. Unter Zugrundelegung dieser Leistungsfähigkeit kann mit Hilfe der dimensionslosen Diagramme in z.B. /18/ eine Bestimmung der maßgebenden Größen für den Brunnenstandort (Breiten BT und BB des oberstromigen Zustrombereiches für Aquiferober- und -unterkante, Staupunkt-Abstand, maximaler Brunnenabstand, usw.) erfolgen, wobei die Diagramme nur für den homogenen Fall gelten. Die Länge der Filterstrecken ist nur bedingt für die hydraulische Wirksamkeit maßgebend, sofern die Filterstrecken eine Höhe aufweisen, die im Vergleich zum konventionellen Brunnen gleichen Durchsatzes ausreichend sind. Zu beachten ist lediglich ein ausreichend hoher abgedichteter Zwischenbereich zwischen den Filterstrecken, um einen direkten hydraulischen Kurzschluß zu vermeiden. Andererseits muß natürlich die Lage und Höhe der Filterstrecken den vorliegenden geologischen und grundwasserhydraulischen Bedingungen entsprechen.

Der Ausbaudurchmesser des Brunnens sollte auf jeden Fall möglichst groß gewählt werden, damit zum einen für den Gas- bzw. Lufteintrag eine ausreichende Oberfläche und zum anderen eine ausreichend große Strip-Zone zur Verfügung steht. Anhand der in Abschnitt 3 be-

schriebenen Erhebung läßt sich in der bisherigen Praxis ein deutlicher Schwerpunkt bei einem Ausbaudurchmesser DN 400 erkennen.

Liegen abweichende Randbedingungen vor (z.B. inhomogener Untergrund), können die für einen vergleichbaren homogenen Fall ermittelten Größen als Anhaltswerte dienen.

Der Brunnen selbst ist auf jeden Fall auch mit einer Reihe von Meßeinrichtungen auszustatten. In Abbildung 5.4 sind die dazu erforderlichen Meßeinrichtungen eingetragen. Dabei handelt es sich um folgende Einrichtungen:

- Durchflußmessung vor der Pumpe, d.h. die der Strippeinheit zufließende Wassermenge wird eindeutig bestimmt. An dieser Stelle ist auch die Möglichkeit der Probenahme zur Bestimmung der Eintritt-Konzentration im Brunnen vorzusehen.
- Luftmengenmessungen in Zu- und Abluft. Mit Hilfe dieser Größen kann ggf. auch der Bodenluftanteil bestimmt werden. Zusammen mit der Abluftkonzentration der Brunnenluft kann so die ausgestrippte Schadstoffmenge bestimmt werden.
- Unterdruckmessung im Brunnenkopf, um die Funktion des Lufteintrages und das durchgesetzte Luftvolumen ermitteln zu können.
- Abluftkonzentration nach dem Abreinigen der Abluft, damit das Einhalten einer Restkontamination in der Abluft nachgewiesen und ein Durchbrechen der Aktivkohlefilter frühzeitig festgestellt werden kann.
- Wasserstandsmessungen mit Filterpeilrohren in der Kiesschüttung des oberen und des unteren Filterbereiches.

Die Restkontamination des nach der Strippung wieder rückgeführten Grundwassers ist im Brunnen selbst nur erschwert meßbar, da eine Entnahme von nicht vollständig entgastem Wasser zu erwarten ist, d.h. es liegen keine eindeutigen Probenahmebedingungen vor. Daher kann das abgereinigte Grundwasser mit ausreichender Sicherheit erst im Abstrombereich außerhalb des Brunnens an den im Umfeld angeordneten Meßstellen beprobt werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß wegen deren notwendigem Abstand vom Brunnen eventuell bereits eine begrenzte Vermischung mit zu- bzw. abfließendem Grundwasser zustande gekommen sein kann. Messungen im äußeren Brunnenfilter können als Näherung und zur Einstellung des GZB's herangezogen werden, sind jedoch wegen der bereits oben genannten Probleme nicht eindeutig.

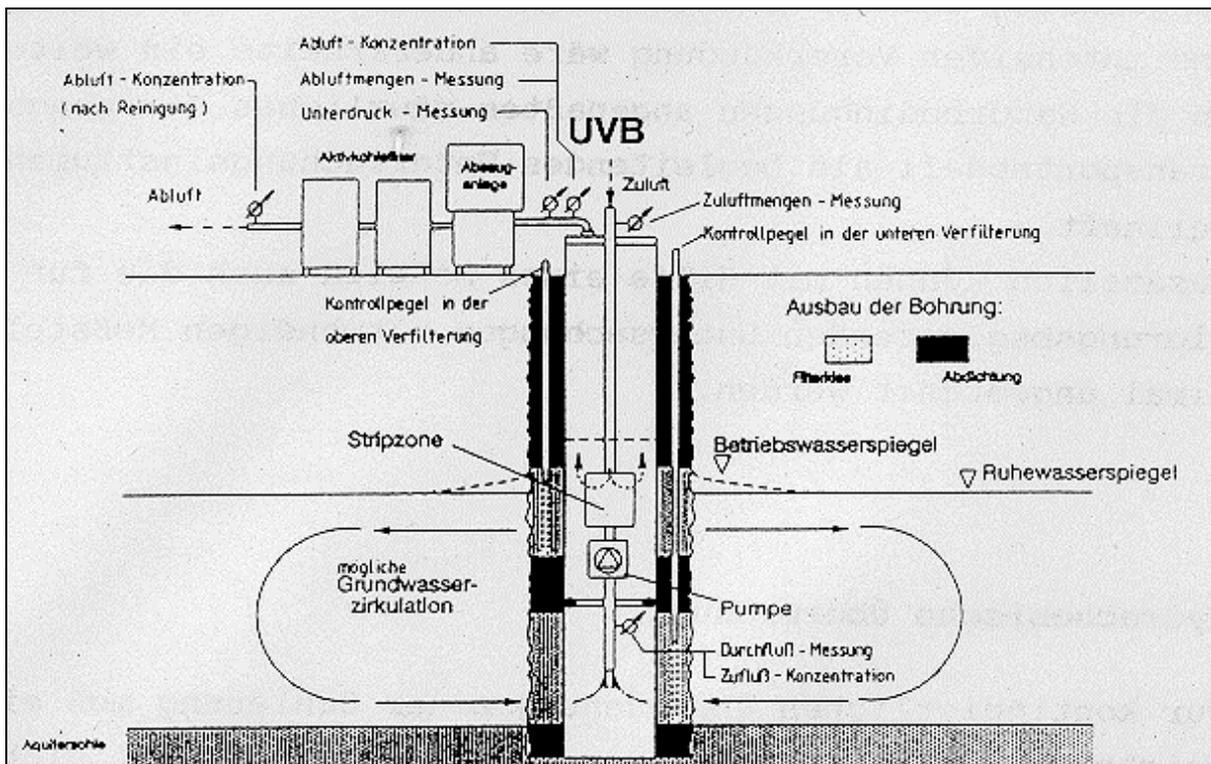


Abb. 5.4: Möglicher Ausbau und Ausstattung mit Meßgeräten eines UVB's (nach /18/)

Die Mengenumessungen am Sanierungsbrunnen sollten möglichst kontinuierlich erfolgen und die Konzentrationsmessungen sollten regelmäßig zusammen mit den Beprobungen an den Kontrollmeßstellen vorgenommen werden.

Um den Brunnen an die notwendige hydraulische Wirkung und vor allem auf die komplexen Strömungsbedingungen im umgebenden Untergrundbereich sachgerecht anpassen und betriebstechnisch steuern zu können, ist unbedingt eine begleitende Untersuchung des speziellen Falles mit einem Grundwassermodell anzuraten. Dieses kann möglicherweise von einfachem Aufbau sein (wie in Abschnitt 4 und Anlage 2 beschrieben), um wenigstens einen näherungsweisen Überblick über die zu erwartenden Hauptströmungsbedingungen und deren meßtechnische Erfassung zu liefern. In größeren Sanierungsfällen und bei entsprechender meßtechnischer Ausstattung und intensiver Vorerkundung wäre andererseits ein weitergehend an die Naturbedingungen angepaßtes räumliches Strömungs- und Transportmodell als begleitendes Untersuchungsinstrument vorteilhaft.

Zusätzlich können mit Hilfe eines Modells auch die für die sanierungsbegleitenden Untersuchungen notwendigen Meßstellen optimal angeordnet werden.

## Hydrochemische Überwachung

Zur kontinuierlichen Überwachung einer Sanierung muß eine Aufzeichnung der physikochemischen Daten in möglichst dichter zeitlicher Reihe erfolgen. Außerdem sind unbedingt auch in regelmäßigen Abständen Grundwasserproben hinsichtlich des breiteren Qualitätsspektrums zu untersuchen.

Für die zeitlich dichte Aufzeichnung sind mindestens folgende Grundparameter zu erheben:

- Grundwasserstand
- pH-Wert
- Leitfähigkeit
- Sauerstoffgehalt

Die Grundwasserbeprobung sollte unbedingt zu Beginn täglich auf fallspezifische Leitparameter und wöchentlich auf das gesamte Spektrum der Schadstoffe einschließlich der Abbauprodukte erfolgen. Nachdem die Sanierung eingefahren ist und die festgestellten Schwankungen der Beobachtungswerte es zulassen, kann die Erhebung der Leitparameter zweimal wöchentlich und des gesamten Spektrums zweiwöchentlich erfolgen. Dabei ist grundsätzlich zu beachten, daß die Probengewinnung und -untersuchung mit der Ermittlung des Nullzustandes vergleichbar ist.

Da eine Sanierung sich in der Regel über einen längeren Zeitraum hinzieht, machen die Unterhaltungs- und Betreuungskosten einen nicht unerheblichen Anteil an den Gesamtkosten aus. Zur Einsparung von Kosten ist ggf. im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse zu prüfen, ob eine automatische Aufzeichnung der in dichter Folge zu ermittelnden Größen (siehe oben) sinnvoll und zweckmäßig

ist. Um eine Kontinuität in der Probengewinnung zu gewährleisten und eventuell Kosten zu sparen, sollten die Meßstellen nach Möglichkeit mit stationären Meßeinrichtungen ausgestattet werden.

### 5.3 Anwendungsgrenzen

Wie bereits in Abschnitt 2.4 bei der Gesamtbetrachtung der Verfahren näher erläutert, ist eine Anwendung des GZB beim Vorliegen getrennter Grundwasserstockwerke zu unterlassen. In diesem Fall kann sich keine vollständige Zirkulationsströmung ausbilden und die Gefahr einer Schadstoffverschleppung ist gegeben.

Weiter ist beim derzeitigen Kenntnisstand die generelle Anwendung des GZB bei Kluftgrundwasserleitern nicht unbedingt zu empfehlen. Hier können sich durch vorhandene Klüfte Hauptfließwege für die Zirkulationsströmung ausbilden, in denen der überwiegende Teil des umgesetzten Wasservolumens fließt. In den übrigen Bereichen erfolgt dann nur ein geringer bis gar kein Schadstoffaustrag.

Durch Inhomogenitäten der Klüfte, die eventuell im Rahmen der Erkundung nicht erkannt werden, kann sich auch bei Kluftgrundwasserleitern eine unvollständige Zirkulationsströmung ausbilden und zum Austrag nicht vollständig abgereinigten Grundwassers führen. Nur im Einzelfall kann daher bei Vorliegen ausreichender Informationen über die standortmaßgebende Untergrundstruktur und die Wasserführung in einem Kluftgrundwasserleiter und bei besonders sorgfältiger Planung und Betriebsüberwachung der Einsatz eines GZB erwogen werden.

Beim Vorliegen hoher Eisen- und/oder Mangangehalte besteht durch den Sauerstoffaustrag mit abgereinigtem Wasser generell die Gefahr der Brunnenverockerung. In diesen Fällen ist

zumindest die zur Strippung benötigte Luft im Kreislauf zu führen oder durch ein Inertgas zu ersetzen.

Liegt kein reiner CKW-Schadensfall vor, sondern handelt es sich um eine Mischkontamination, ist neben der Strippung der leichtflüchtigen Stoffe eine weitergehende Behandlung vorzusehen, die sowohl im Grundwasser-Zirkulations-Brunnen selbst als auch außerhalb erfolgen kann. Wegen der besseren Überwachungsmöglichkeiten und des gegebenenfalls zur Verfügung stehenden Platzes ist in diesem Fall eine Aufbereitung des Grundwassers über Gelände vorzuziehen.

Wegen der erzeugten Grundwasser-Zirkulation um einen GZB bei gleichzeitig relativ geringem Gesamtdurchsatz ist wegen der besonderen räumlichen Reinigungswirkung in einem begrenzten Umfeld seine Anordnung unmittelbar am Schadensherd zu bevorzugen. Dementsprechend eignet er sich unter Umständen weniger zur Abreinigung einer Schadstofffahne, vor allem auch bei starkem Abstrom. Andererseits wird die Einsatzmöglichkeit auch ungünstiger, wenn die Breite der Schadstofffahne den Einsatz einer Brunnengalerie erfordert. In diesem Fall muß gemäß Abschnitt 2.4 und 4 die 3- bis 10-fache Anzahl von GZB's gegenüber konventionellen Brunnen in einer Reihe angeordnet werden.

## 6. Folgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Ausarbeitung wurde versucht, die grundlegenden Vorgänge der Grundwasserströmung, des Stofftransportes und der Gesamtwirkung von "Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB)" sowohl mit modellmäßigen Ansätzen als auch aufgrund von Erfahrungen aus praktischen Fällen darzustellen und zu beurteilen.

Dabei trat deutlich die außerordentliche Komplexheit dieser Verfahren im Zusammenwirken vielfältiger Einflüsse und Reaktionen zu Tage, die gleichzeitig eine überschaubare Steuerung und Kontrolle, aber auch eine zuverlässige Effizienzüberprüfung im praktischen Fall erheblich erschwert.

Bei der praktischen Anwendung ist daher eine äußerst sorgfältige Planung und Überwachung anzuraten, um ungünstige Fehleinsätze mit Nebenwirkungen zu vermeiden. So muß schon die Erkundung des Untergrundaufbaues und der hydrologisch-hydraulischen Bedingungen im Grundwasserbereich bei Einsatz dieses Verfahrens besonders intensiv erfolgen, da sie für Ausbaudetails und Wirkungsweise von ausschlaggebender Bedeutung sein kann.

Die hohe Sensibilität des Verfahrens gegenüber Schwankungen der maßgebenden Einflußgrößen wie Brunnendurchsatz, Grundwasserzustrom und Untergrundstruktur in Verbindung mit Art und Umfang der Grundwasserkontamination und ihrer effektiven Sanierung im Brunnen kann durchaus von Fall zu Fall auch zu von der einfachen Grundvorstellung abweichenden Wirkungen führen. So ist beispielsweise infolge zeitlicher Schwankungen der hydrologischen und betriebsmäßigen Bedingungen sowie des Stoffgehaltes des antransportierten Wassers mit entsprechenden Schwankungen im Gesamtgleichgewicht zwischen Zirkulationsströmung und Grundwasserzufluß und in der Entgasungswirkung im Brunnen zu rechnen.

Zur Verdeutlichung der jeweiligen Grundwasser-Zirkulationsströmung sollten daher grundsätzlich die hydraulischen Vorgänge im Umfeld eines GZB's mit Hilfe eines numerischen Modells untersucht und dargestellt werden. Nur mit Einsatz von Modellmethoden sind die im jeweiligen Fall möglichen komplexen hydraulischen Vorgänge im Umfeld des Brunnens erkennbar zu machen. Dabei spielt es keine Rolle, ob eine exakte Nachbildung der Untergrundbedingungen durchführbar ist, da nur so die Haupteinflüsse und Hauptwirkungen festgestellt und abgegrenzt werden können. Auf diese Weise kann bestmöglich die Einsetzbarkeit eines oder verschiedener GZB am jeweils betrachteten Standort ermittelt und deren Ausbau optimal entwickelt werden. Nachdem inzwischen relativ einfache und leicht anwendbare Programmsysteme verfügbar sind, dürfte es außer Frage stehen, daß diese Planungshilfe gerade bei derart komplexen Sanierungsmaßnahmen herangezogen werden muß.

Von wesentlicher Bedeutung bei der Beurteilung des Verfahrens ist auch die Tatsache, daß im Gegensatz zu konventionellen Entnahmebrunnen der erfaßbare Anteil von zufließendem Grundwasser erheblich geringer und ungleichmäßiger verteilt ist. Somit ist der Durchsatz des GZB zwar als Maß für dessen brunnentechnische Dimensionierung zu vertreten und kann auch zur Bestimmung der Entgasungswirkung und dazu erforderlicher Installationen dienen. Die Leistungsfähigkeit eines solchen Brunnens hinsichtlich der Erfassung und Durchleitung eines kontaminierten Grundwasserzustromes ist dagegen zunächst nur abschätzbar und allen-

falls auf ein Maß zwischen 10 % und 50 % des Brunnendurchsatzes anzusetzen. Dies erfordert bei notwendiger Erfassung einer Schadstofffahne durch einen oder mehrere Brunnen zumindest eine entsprechend höhere Ausbauleistung, sofern erreichbar, oder aber im Vergleich zu konventionellen Brunnen eine drei- bis zehnfach größere Brunnendichte in einer Abschirmreihe, um mit Sicherheit unbehandelten Abstrom zu verhindern.

Andererseits ist festzustellen, daß das GZB-Verfahren bei einer örtlich konzentrierten Grundwasserverunreinigung mit leichtflüchtigen Stoffen gerade auch in gegen Grundwasserabsenkungen empfindlichen Bereichen eine günstige Möglichkeit wesentlicher Abreinigung des Grundwassers bietet, sofern es sachgerecht ein-gesetzt und überwacht wird. Die Möglichkeit einer brunneninternen intensiven Strippung mit gleichzeitigem mehrfachen Durchspülen des Untergrundes in Brunnumgebung kann besonders bei der Anordnung im Schwerpunktbereich der Verunreinigung unter sorgfältiger Berücksichtigung des anstehenden Untergrundes einen hohen Wirkungsgrad der Abreinigung mit sich bringen. Dagegen können im Einzelfall die weiter oben angeführten möglichen Nebenwirkungen als weniger bedeutungsvoll angesehen werden.

Infolge dieser Tatsachen wird es von Fall zu Fall vorteilhaft sein, einen oder verschiedene GZB als Teil einer Gesamtanierung kombiniert mit konventionellen hydraulischen Maßnahmen einzusetzen. Gerade dabei könnten die besonderen Vorteile des GZB zur Hauptabreinigung des Grundwassers von leichtflüchtigen Verunreinigungen im unmittelbaren Schwerpunktbereich der Kontamination genutzt werden. Gleichzeitig könnten die übrigen konventionellen Anlagen zu einer Abschirmung und Restsanierung im Abstrom bzw. auch im Umkreis des GZB dienen, wobei ein sicherer Betrieb und sachgerechte Kontrollmaßnahmen in bereits vielfältig erprobter Weise zu gewährleisten wären.

Auch zukünftig werden möglicherweise nicht alle Einsatzfälle solcher Verfahren mit entsprechend intensiven Erkundungs- und Überwachungsanforderungen belegt werden können. Daher erscheint es unbedingt erforderlich, in weitergehenden systematischen Untersuchungen die Notwendigkeiten und Möglichkeiten einer sicheren Sanierungsplanung und zugehöriger Kontrolleinrichtungen und Betriebsbedingungen bei diesen komplexen Vorgängen zu erforschen. Dazu können einerseits weitere systematische Untersuchungen mit Modellmethoden und begleitenden technisch-wissenschaftlichen Auswertungen dienen. Andererseits aber sind an verschiedenen gut ausgestatteten Teststandorten praktischer Fälle gründliche und nachvollziehbare Untersuchungen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeit, der Wirkung und der notwendigen Planung und Überwachung solcher Sanierungen durchzuführen, die zumindest in absehbarer Zeit zu einer Klärung eines Großteils der hier angesprochenen offenen Fragen führen können. Der derzeit betriebene Teststandort Karlsruhe-Knielingen kann hier als ein Beispiel angeführt werden. Insbesondere sind dabei auch die dort inzwischen erfolgten umfangreichen Untersuchungen und deren notwendige weitere Auswertung zur Klärung offener Fragen zu erwähnen. Allerdings sind auf jeden Fall auch andere Teststandorte mit weitergehender Gesamtausstattung erforderlich, um vor allem auch unterschiedliche praktische Situationen erfassen zu können.

Nach Vorliegen von eindeutigen Ergebnissen aus solchen Teststandorten können voraussichtlich auch zielgerechtere und vereinfachte Erkundungs- und Überwachungsmaßnahmen entwickelt werden, die trotzdem einen zuverlässigen Einsatz des GZB-Verfahrens mit besseren Möglichkeiten der Sanierungsplanung und der Effizienzbeurteilung erlauben.

Ein zusätzlicher Untersuchungs- und Optimierungsbedarf besteht beim GZB vor allem auch bei der Ausgestaltung, Wirkung und Kontrolle der brunneninternen Strippeinrichtung. Hier wäre einerseits die Erzielung höherer Wasserdurchsätze bei bestmöglichem Abreinigungseffekt anzustreben, während andererseits spezielle zuverlässige Meßmethoden für den erreichten Reinigungsgrad beim abströmenden Wasser noch im Brunnen oder direkt außerhalb zu entwickeln und zu erproben wären.

Ansonsten kann festgestellt werden, daß es grundsätzlich beim Einsatz spezieller Reinigungsverfahren für den Untergrund und das Grundwasser, wie es die beschriebene Verfahrensgruppe darstellt, nicht sinnvoll erscheint, dies von vornherein als Sanierung oder gar vollständige Sanierung anstehender Untergrundkontaminationen in Anwendung zu bringen. Damit muß schon eine Verpflichtung für das Erreichen eines hoch anzusetzenden Gesamtzieles verbunden werden. Dies ist einerseits nach den bisherigen praktischen Erfahrungen auch für die Abreinigung leichtflüchtiger Wasserverunreinigungen nur bei geringeren Durchsätzen und mit begrenzter Kontrollmöglichkeit erreichbar. Dagegen bestehen noch erhebliche Wissensdefizite beim Vorliegen von Mischverunreinigungen im Grundwasser und bei einer dabei zustandekommenden Teilreinigung und dem Austrag von anderen Verunreinigungen aus dem Brunnen mit deren Verteilung im Untergrund infolge der spezifischen Zirkulationsströmung.

Demgemäß sollte man dieses Verfahren zumindest bis zum Vorliegen weiterer Erkenntnisse nur im Rahmen seiner besonderen Möglichkeiten für die wirkungsvolle Reinigung von Untergrundverunreinigungen mit leichtflüchtigen Stoffanteilen (insbesondere Halogenkohlenwasserstoffe) einsetzen. Bei der Anordnung im Verunreinigungsschwerpunkt wird in diesem Fall bei sorgfältiger Anwendung ein erheblicher Reinigungseffekt erzielbar sein, der eine Abwanderung oder Ausbreitung dieser Kontamination maßgebend vermindern bzw. verhindern kann. Dabei spielt zunächst nicht der Vollzug einer vollständigen Sanierung sondern eher die schnelle Erzielbarkeit einer wesentlichen Verbesserung die wesentliche Rolle. Daß auch in diesem Fall trotzdem eine gründliche und zuverlässige Erkundung, Planung und Überwachung angebracht ist, steht außer Frage.

## 7. Verwendete Schriften

- /1/ Barczewski, B.; Hager, E.: Erprobung und Optimierung eines In-Situ-Grundwasserreinigungssystems  
Vortrag anlässlich der UTECH Berlin 1992, im Druck  
Berlin 1992
- /2/ Brannath, A.: Dokumentation und Bewertung von Grundwassersanierungen mittels UVB-Verfahren sowie Feldversuche an einem Standort im Lockergestein  
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe  
Karlsruhe 1991, unveröffentlicht
- /3/ Brinell, P.: Grundwasser- und Bodenluftreinigung mit Hilfe des UVB-Verfahrens: (Fallbeispiele, Grundprinzip, Bemessungsgrundlagen) in:  
Probleme mit dem Grundwasser Umweltplanung,  
Arbeits- und Umweltschutz, Heft Nr. 121  
Hrsg.: Hessische Landesanstalt für Umwelt Wiesbaden 1991
- /4/ Bürmann, W.: Grundwassersanierung mit Hilfe der Zirkulationsströmung um den kombinierten Entnahme- und Einleitungsbrunnen  
- Funktion und Bemessung des Brunnens  
sowie:  
Untersuchung der Zirkulationsströmung um den kombinierten Entnahme- und Einleitungsbrunnen zur Grundwassersanierung am Beispiel des Unterdruck-Verdampfer-Brunnens (UVB) in:  
Arendt, F. et al. (Hrsg.):  
Altlastensanierung '90, Band II, Dordrecht, Boston, London 1990
- /5/ Bürmann, W.: Zur Zirkulationströmung am Unterdruck-Verdampfer-Brunnen in: Probleme mit dem Grundwasser Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft Nr. 121, Hrsg.: Hessische Landesanstalt für Umwelt Wiesbaden 1991
- /6/ Czurda, K.A.: Sanierung bindiger Böden: Reduzierte Erfolgsaussichten durch das spezifische Transportverhalten und Rückhaltevermögen in:  
Neuer Stand der Sanierungstechniken von Altlasten,  
IWS-Schriftenreihe, Band 10, Berlin 1990
- /7/ DVWK: Sanierungsverfahren für Grundwasserschadensfälle und Altlasten - Anwendbarkeit und Beurteilung, DVWK-Schriften Nr. 98, Hamburg 1991
- /8/ DVWK: Stofftransport im Grundwasser, DVWK-Schriften Nr. 83, Hamburg 1989
- /9/ GFS: IEG-Unterdruck-Verdampfer-Brunnen (IEG-UVB), Bodenluftabsaugung über Doppelmantelfilter (BLD),  
Koaxiale Grundwasserbelüftung (KGB), GFS (Eigenverlag), Kirchheim 1991
- /10/ Herrling, B.; Buermann, W.: A New Method for In-Situ Remediation of Volatile Contaminants in Groundwater  
- Numerical Simulation of the Flow Regime in: Proc. VIII Int. Conf. on Computational Methods in Water Resources, Venice 1990 Berlin, Heidelberg, New York 1990
- /11/ Herrling, B.; Buermann, W.; Stamm, J.: Insitu remediation of volatile contaminants in groundwater by a new system of "Underpressure-Vaporizer-Wells" in: Proc. of the Conference on Subsurface Contamination by Immiscible Fluids, Calgary 1990, Rotterdam 1990

- /12/ Herrling, B.; Buermann, W.; Stamm, J.: In Situ Groundwater Remediation of strippable or volatile Contamination using the UVB-Method in:  
Proc. Advances in water resources technology, Athens 1991
- /13/ Herrling, B.; Buermann, W.; Stamm, J.; Schoen, M.: UVB Technique for in-situ Groundwater Remediation of strippable Contaminants: Operation and dimensioning of wells in:  
Proc. Envirotech Vienna 1990, Vienna 1990
- /14/ Herrling, B.; Bürmann, W.: UVB-Verfahren - Grundprinzipien und Messungen in: Bock, P. et al.:  
Untergrundsanie rung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen  
Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Band 9, Karlsruhe 1990
- /15/ Herrling, B.; Bürmann, W.; Stamm, J.: In-Situ-Beseitigung leichtflüchtiger Schadstoffe aus dem Grundwasserbereich mit dem UVB-Verfahren in:  
Neuer Stand der Sanierungstechniken von Altlasten  
IWS-Schriftenreihe, Band 10, Berlin 1990
- /16/ Herrling, B.; Bürmann, W.; Stamm, J.: In-Situ-Grundwasserreinigung von strippbaren Schadstoffen mit dem Unterdruck-Verdampfer-Brunnen (UVB):  
Numerische Berechnungsergebnisse in:  
Arendt, F. et al.:  
Altlastensanierung '90, Dordrecht, 1990
- /17/ Herrling, B.; Stamm, J.: Numerical Results of Calculated 3D Vertical Circulation Flows Around Wells with Two Screen sections for In-Situ or On-Site Aquifer Remediation in:  
Proc. IX Int. Conf. on Computational Methods in Water Resources, June 9 - 12, 1992, Denver, CO (USA) in press
- /18/ Herrling, B.; Stamm, J.; Alesi, E. J.; Brinnel, P.; Hirschberger, F.; Sick, M. R.: In-situ Grundwassersanierung von strippbaren Schadstoffen mittels Unterdruck-Verdampfer-Brunnen (UVB):  
Funktionsweise des Brunnens und Bericht über gereinigte Industriestandorte (Deutsche Übersetzung) in:  
Third Forum on Innovative Hazardous Waste Treatment Technologies, June 1991, Dallas/Texas 1991
- /19/ Hötzl, H.; Brannath, A.; Nahold, M.: Dokumentation und Bewertung von ausgewählten CKW-Schadensfällen im Grundwasser und deren Sanierung mittels UVB-Verfahren, Karlsruhe 1990, unveröffentlicht
- /20/ Hoffmann, K.: Auswahlkriterien und Auswahl von Sanierungsmaßnahmen und deren Durchführung: Erläutert am Beispiel eines ehemaligen Betriebes der Eisen- und Stahlindustrie in Düsseldorf, in:  
Arendt, F. et al. (Hrsg.): Altlastensanierung '90, Band II, Dordrecht, Boston, London 1990
- /21/ IEG: Unterdruck-Verdampfungs-Brunnen der IEG Reutlingen (UVB-Verfahren) Eigenverlag, Reutlingen
- /22/ Institut für Umwelttechnik GmbH, Berlin: Gutachtliche Stellungnahme über die Tauglichkeit von verschiedenen in-Situ-Stripperverfahren, Berlin 1990
- /23/ Käss, W.; Strayle, G.: UVB-Verfahren aus der Sicht des Anwenders - Ergebnisse von Markerversuchen in:  
Bock, P. et al.: Untergrundsanie rung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen  
Schriftenreihe Angewandte Geologie, Karlsruhe, Band 9, Karlsruhe 1990

- 
- /24/ Kinzelbach, W.; Rausch, R.: ASM-Aquifer-Simulations-Modell Programmdokumentation, Kassel 1992
- /25/ Toussaint, B.: Einfluß der Probenahmetechnik auf die Ergebnisse qualitativer Grundwasseruntersuchungen unter besonderer Berücksichtigung von Grundwasserschadensfällen durch leichtflüchtige halogenorganische Verbindungen in: Probleme mit dem Grundwasser Umweltschutz, Arbeits- und Umweltschutz, Heft Nr. 121, Hrsg.: Hessische Landesanstalt für Umwelt, Wiesbaden 1991
- /26/ Wagner, H.: Hydraulische, hydrogeologische und chemische Untersuchungen im Rahmen des UVB-Forschungsvorhabens Diplomarbeit am Institut für Hydromechanik und am Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1992, unveröffentlicht
- /27/ ZÜBLIN AG: In-Situ-Grundwasserreinigung System ZÜBLIN Eigenverlag, Stuttgart 1991

# Anlage 1

Tabellarische Zusammenstellung der bisher in der Literatur bzw. in der Zusammenstellung des Institutes für Angewandte Geologie /19/ dargestellten **Anwendungsfälle** des UVB-Verfahrens

## Blatt 1

Projekt	Rhein-Ruhr-Gebiet (L1) UVBI	Rhein-Ruhr-Gebiet (L2) UVBII
Zitiert	Herrling, Stamm, Alesi, Brinzel, Hirschberger, Sick 1991	Herrling, Stamm, Alesi, Brinzel, Hirschberger, Sick 1991
Gutachter		
Schadstoff	TRI	TRI
Brunnenbauart	o.T.; o.P.	m.T.; m.P:
Brunnen-Durchmesser	DN 600	800 mm / DN 400
wirks. Brunnenlänge	8,5	33,7
oberer Filter	8,5	9
unterer Filter	8,5	4,9 und 4,8
Bodenart	Fein-Mittelsand, sandiger Kies	Fein-Mittelsand, sandiger Kies
$K_f$ – Wert	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
Förderleistung	$\sim 5 \text{ m}^3 / \text{h}$	$20 \text{ m}^3 / \text{h}$
Eintragungsort		
Voruntersuchungen		
Messungen		
Konz. v. Sanierung	5.000 $\mu\text{g/l}$ TRI	
Sanierungsziel		in Abhängigkeit von der Zu- stromkonzentration
Konz. n. Abschluß		
Schadstoffaustrag	$\sim 1,6 \text{ kg/d}$	
Abluft		
Bodenluftanteil		
Temperatur		
Feuchte		
Betrieb von – bis		
Besonderheiten:		durch Packer unterer Filterbe- reich wählbar

**Blatt 2**

<b>Projekt</b>	<b>Karlsruhe (L3)</b>	<b>Mannheim-Käfertal (L4)</b>
zitiert	Bürmann 1991	Bürmann 1990 Herrling, Bürmann, 1990
Gutachter		
Schadstoff		PER
Brunnenbauart	m.T.; m.P:	o./m.T.; o./m.P.
Brunnen-Durchmesser	220 mm / DN160	mm / DN400
wirks. Brunnenlänge	6,75 m	30,0 m
oberer Filter	2,8 m	5,5 m
unterer Filter	1,8 m	3,0 m
Bodenart	Mittelsand	Mittelsand
$K_f$ - Wert	$5 \cdot 10^{-4}$	
Förderleistung		18,1 m <sup>3</sup> / h / 13,3 m <sup>3</sup> / h
Eintragungsort	bekannt	
Voruntersuchungen	umfangreiche	
Messungen	ja	ja
Konz. v. Sanierung		100 µg/l
Sanierungsziel		
Konz. n. Abschluß		
Schadstoffaustrag		
Abluft		
Bodenluftanteil		64 %
Temperatur		
Feuchte		33 %
Betrieb von – bis	Nach längeren Unterbrechungen seit 03.02.1992 wieder in Be- trieb	Bis 13.06.89 o.T./o.P. ab 13.06.89 m.T./m.P.
Besonderheiten	Versuchsanlage, Ergebnisse liegen im Rahmen einer Diplo- mararbeit vor	Verkalkung, Verockerung

**Blatt 3**

<b>Projekt</b>	<b>Berlin (L5)</b>	<b>Nürnberg (L6)</b>
zitiert	Brinnel 1991 Herling, Bürmann, Stamm 1990 Herling, Stamm, Alesi, Brinnel, Hirschberger 1991	Brinnel 1991
Gutachter		
Schadstoff	1,1,1-TRI DCM	1,1,1-TRI TRI
Brunnenbauart	o.T.; o.P.	m.T., m.P.
Brunnen-Durchmesser	500 mm /DN400	500 MM / DN150
Wirks. Brunnenlänge	6,7 m	3,0 m
Oberer Filter	3,0 m	1,0 m
Unterer Filter	2,1 m	1,7 m
Bodenart	Mittelsand	Blasensandst. Klüft.
K <sub>f</sub> -Wert	1*10 <sup>-4</sup> - 1*10 <sup>-6</sup> m/s	Nicht bestimmbar, da Bohrun- gen durch 2 GW-Leiter, wobei unterer gespannt
Förderleistung		400 l/h
Eintragungsort	bekannt	Nicht genau erkundet
Voruntersuchungen	ja, keine Schadstofftiefenvert.	ja, bis auf Tiefe des GW-Leiters
Messungen	ja	ja
Konz. v. Sanierung	Ges.LCKW 650 µg/l	
Sanierungsziel	1,1,1-TRI < 50 µg/l	Ges. LHKW < 10 µg/l
Konz. n. Abschluß	Ges.LCKW 30 µg/l	
Schadstoffaustrag	1.310 kg	noch nicht ausgewertet
Abluft		
Bodenluftanteil	~ 30 %	
Temperatur	31 – 33 °C	24 – 32 °C
Feuchte	31 – 40 %	45 – 55 %
Betrieb von – bis	04.04.89 - 05.07.90	11.07.90 - ?
Besonderheiten		UVB-Brunnen in Verbindung mit Bodenluftabsaugung und Grundwasserentnahme.

**Blatt 4**

<b>Projekt</b>	<b>Untersulmentingen (L7)</b>
Zitiert	Herrling, Bürmann, Stamm 1990
Gutachter	
Schadstoff	Tracerversuche
Brunnenbauart	m. T.; m.P
Brunnen-Durchmesser	DN400
wirks. Brunnenlänge	4,5
oberer Filter	1,2
unterer Filter	1,2
Bodenart	pleistozäner Schotter
$K_f$ - Wert	$1 \cdot 10^{-3}$ m/s
Förderleistung	
Eintragungsort	
Voruntersuchungen	
Messungen	
Konz. v. Sanierung	
Sanierungsziel	
Konz. n. Abschluß	
Schadstoffaustrag	
Abluft	
Bodenluftanteil	
Temperatur	
Feuchte	
Betrieb von – bis	
Besonderheiten	

**Blatt 5**

<b>Projekt</b>	<b>Heslach (H1)</b>	<b>Asperg (H2)</b>
Zitiert	Hötzl 1990	Hötzl 1990
Gutachter	Herreß Geotechnik	Harreß Geotechnik
Schadstoff	PER; DCM; CIS TRI; 1,1,1-TRI	PER; Methylenchlorid; VC; TRI 1,1,1-TRI;
Brunnenbauart	k.A.	m.P., m.T.
Brunnen-Durchmesser	600 mm /DN400	600 MM / DN400
wirks. Brunnenlänge	15,8 m	9,5 m
oberer Filter	15,8 m	2,5 m
unterer Filter	15,8 m	2,0 m
Bodenart	Ton- u. Schluffsteine	Ton- u. Mergelsteine,
$k_f$ - Wert	$1 \cdot 10^{-5}$ m/s	$2,8 \cdot 10^{-4}$ - $2,4 \cdot 10^{-6}$
Förderleistung		
Eintragungsort	bekannt	bekannt
Voruntersuchung	ja.	ja
Messungen	ja	ja
Konz. v. Sanierung	77.000 $\mu\text{g/l}$ TRI / 18.000 $\mu\text{g/ m}^3$ PER	> 200.000 $\mu\text{g/l}$ > 400.000 $\mu\text{g/m}^3$
Sanierungsziel		
Konz. n. Abschluß		
Schadstoffaustrag	1.000 kg (Stand November 1989)	725 kg, davon 150 kg UVB
Abluft	340 $\text{m}^3/\text{h}$	794 $\text{m}^3/\text{h}$
Bodenluftanteil	~ 12 %	
Temperatur		
Feuchte		
Betrieb von – bis	25.02.1988 - ?	14.11.1988 - ?
Besonderheiten	Kombination von Sanierungs- brunnen, Stripanlage, Luftab- saugung und UVB Schadstoffaustrag schwankend Fördermengen schwanken “Sanierungsverlauf mittels UVB nur unvollständig dokumentiert“	Kombination von Sanierungs- brunnen, Stripanlage, Luftab- saugung und UVB Art der Probenahme (Pumpe) sehr wichtig “UVB-Verfahren sehr effektiv“

**Blatt 6**

<b>Projekt</b>	<b>Schelklingen (H3)</b>	<b>Gingen / Brenz (H4)</b>
zitiert	Hötzl 1990	Hötzl 1990
Gutachter	Hydrodata Dr. Brinnel	BWU Dr. Alesi
Schadstoff	PER; Schwermetalle; Schnede- öle; TRI; CIS; 1,1,1-TRI	PER; 1,1,1-TRI; TRI; DCM
Brunnenbauart	o.T.; o.P.	o.T., o.P.
Brunnen-Durchmesser	600 mm /DN400	340 mm / DN150
wirks. Brunnenlänge	8,9 m	5,0 m
oberer Filter	5,41 m	0,6 m
unterer Filter	1,0 m	1,5 m
Bodenart	Kalkschotter; Kies	Torfe; Schluff; Fein-Mittelkies
$k_f$ - Wert		$1 \cdot 10^{-4}$
Förderleistung		
Eintragungsort	bekannt	bekannt
Voruntersuchung	ja	ja
Messungen	nein	nein
Konz. v. Sanierung	1.800 $\mu\text{g/l}$ CKW 290.000 $\mu\text{g/l}$ PER	140 $\mu\text{g/l}$ TRI (Fahne) 50.000 $\mu\text{g/m}^3$ TRI
Sanierungsziel		
Konz. n. Abschluß		< 15 $\mu\text{g/l}$
Schadstoffaustrag		2,5 kg – 3 kg
Abluft	840 $\text{m}^3/\text{h}$	450 $\text{m}^3/\text{h}$
Bodenluftanteil	71,5 %	84,5 %
Temperatur	~ 18 – 28°C	
Feuchte	~ 40 – 65 %	
Betrieb von – bis	16.01.1990 -	31.08.1987 ca. 1 Jahr Betrieb
Besonderheiten	Luftabsaugung und UVB Er- kundung nicht umfassen	1 UVB keine Restkontamination

**Blatt 7**

<b>Projekt</b>	<b>Plochingen (H5)</b>	<b>Tübingen (H6)</b>
zitiert	Hötzl 1990	Hötzl 1990
Gutachter	BWU Dr. Alesi	GLA Freiburg
Schadstoff	1,1,1-TRI	TRI; PER; 1,1,1-TRI; CIS, FCKW
Brunnenbauart	m.T.; m.P. Pumpe ab 18.05.1989	o.T., o.P.
Brunnen-Durchmesser	450/410 mm / DN300	1200/1000 mm /DN600
wirks. Brunnenlänge	3,75 m	5,5 m
oberer Filter	1,5 m	5,5 m
unterer Filter	1,5 m	5,5 m
Bodenart	Sande / Kiese	Lehmige Kiese
$k_f$ - Wert	$7 \cdot 10^{-5}$ m/s $1,2 \cdot 10^{-4} K_h$	$5 \cdot 10^{-3}$ - $6 \cdot 10^{-3}$ m/s
Förderleistung		
Eintragungsort	bekannt	
Voruntersuchung		
Messungen	ja	ja O <sub>2</sub>
Konz. v. Sanierung	>5000.000 µg/m <sup>3</sup> (1,1,1-TRI) Bodenluft	
Sanierungsziel		
Konz. n. Abschluß	< 10 µg/l	Keine 0 µg/l
Schadstoffaustrag	2,8 kg, davon 1,1 kg UVB	27g
Abluft	110 m <sup>3</sup> /h (m.P.) 200 m <sup>3</sup> /h (o.P.)	860 m <sup>3</sup> /h / 700 m <sup>3</sup> /h /360 m <sup>3</sup> /h
Bodenluftanteil	60 % (m.P.) /45 % (o.P.)	17,5% / 30% / 67% 3-stufig
Temperatur		
Feuchte		
Betrieb von – bis	19.12.1988 14.12.1989 – 13.03.1990 Still- stand 30.11.90 bis heute	11.11.1986 – 27.04.1987
Besonderheiten	Luftabsaugung und UVB	

**Blatt 8**

<b>Projekt</b>	<b>Eislingen (H7)</b>	<b>Neckarsulm (H8)</b>
Zitiert	Hötzl 1990	Hötzl 1990
Gutachter	BWU Dr. Alesi	BWU Dr. Alesi
Schadstoff	PER; TRI; 1,1,1-TRI; Te- trachlorkohlenstoff	PER; 1,1,1-TRI; TRI; arom. KW's; Schwermetalle, Cyanide
Brunnenbauart	o.P.; o.T.	alle Varianten im Betrieb gete- stet
Brunnen-Durchmesser	800/620 mm / DN400	650/560 mm /DN400
wirks. Brunnenlänge	3,40 m	2,95 m
oberer Filter	1,00 m	1,55 m
unterer Filter	2,10 m	1,10 m
Bodenart	Flußsedimente, sandi- ge/schluffige Kiese	quartäre Sedimente
$k_f$ - Wert	$8,8 \cdot 10^{-4}$ m/s	$1,4 \cdot 10^{-3}$ m/s
Förderleistung		
Eintragungsort	bekannt, aber verwischt	bekannt
Voruntersuchung	wenig	
Messungen	ja	ja
Konz. v. Sanierung	12.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PER 9.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ TRI 155 $\mu\text{g}/\text{l}$ 1,1,1-TRI	73.000 $\mu\text{g}/\text{l}$
Sanierungsziel		
Konz. n. Abschluß	< 5 $\mu\text{g}/\text{l}$	
Schadstoffaustrag	>10 kg(UVB)	>100 kg CKW; davon ca. 30 kg UVB
Abluft	480 $\text{m}^3/\text{h}$	300 $\text{m}^3/\text{h}$
Bodenluftanteil	48 %	90 %
Temperatur		
Feuchte		
Betrieb von – bis	Sanierungsbrunnen 22.06.- 26.06.87 Luftabsaugung 23.06.-06.07.87 UVB ab 22.03.89	24.08.1989
Besonderheiten	Zwischenzeitlich abgeschaltet. Bei Absaugung 6 g/Tag (Bo- denluft). Mit UVB anfangs ~ 600 g/Tag, später ~ 20 g/Tag CKW	Luftabsaugung und UVB Hin- weis auf Verockerung, umfang- reiche Messungen

**Blatt 9**

<b>Projekt</b>	<b>Ebersbach (H9)</b>	<b>Denkendorf (H10)</b>
Zitiert	Hötzl 1990	Hötzl 1990
Gutachter	BWU Dr. Alesi	BWU Dr. Alesi
Schadstoff	PER; TRI; 1,1,1-TRI; Mineralöl	PER; 1,1,1-TRI; TRI; DCM
Brunnenbauart	o.P.; o.T. (Darstellung m.T)	o.P.; o.T.
Brunnen-Durchmesser	700 mm / DN400	273 mm /DN150
wirks. Brunnenlänge	6,60 m	
oberer Filter	6,60 m	
unterer Filter	6,60 m	
Bodenart	verwitterter Sandstein	schluffige Mittel- bis Grobkiese
k <sub>f</sub> - Wert		
Förderleistung		
Eintragungsort	bekannt	bekannt
Voruntersuchung	ja	ja
Messungen	nur Abluft	nur Abluft
Konz. v. Sanierung	15.000 µg/l PER 9.000 µg/m <sup>3</sup> PER	9.900 µg/l TRI 28 µg/l PER
Sanierungsziel		
Konz. n. Abschluß	vorhanden	vorhanden
Schadstoffaustrag	210 kg	18,5 kg
Abluft	400 m <sup>3</sup> / h	
Bodenluftanteil	62,5 %	
Temperatur		
Feuchte		
Betrieb von – bis	07.10.1987-	15.12.1987
Besonderheiten		Lochplatte in Höhe GOK "Verlauf der Schadstoffkonzentration schwer nachvollziehbar"

**Blatt 10**

<b>Projekt</b>	<b>Kornwestheim (H11)</b>	<b>Plochingen (H12)</b>
Zitiert	Hötzl 1990	Hötzl 1990
Gutachter	Harreß Geotechnik	BWU Dr. Alesi
Schadstoff	TRI; 1,1,1-TRI; DCM; Tetrachlormethen	PER; TRI ; CIS; VC
Brunnenbauart	k.a.	o.P.; o.T.; m.P./m.T.
Brunnen-Durchmesser	k.a / 5“	600 mm /DN400
wirks. Brunnenlänge	24 m	7,70 m
oberer Filter	10 m 8 m?	2,25 m
unterer Filter	7 m 5m?	2,10 m
Bodenart	Schluff, Lehm, Fels,Lettenkeuper	kiesige, sandige Sedimente
$k_f$ - Wert	$2,5 \cdot 10^{-6}$ m/s	
Förderleistung		12 m <sup>3</sup> /h
Eintragungsort	bekannt	bekannt
Voruntersuchungen	ja	ja
Messungen		nein
Konz. v. Sanierung	99.000 µg/m <sup>3</sup> TRI 1% 1.500 µg/m <sup>3</sup> 1,1,1,-TRI	>300.000 µg/l PER >100.000 µg/m <sup>3</sup> PER
Sanierungsziel		
Konz. n. Abschluß	vorhanden	
Schadstoffaustrag	30 kg, davon 3 kg UVB	220 kg davon 14,5 kg UVB 2.000 kg aus Tanks (UVB)
Abluft		300 – 500m <sup>3</sup> /h
Bodenluftanteil		17 - 50 %
Temperatur		
Feuchte		
Betrieb von – bis	02/89 - 07/89	17.12.1989 -
Besonderheiten	Sanierungsbrunnen probeweise; Luftabsaugung und UVB; Erkundung nur in eine Richtung	Kombination UVB; Sanierungsbrunnen und Luftabsaugung

**Blatt 11**

Projekt	Laupheim (H13) Untersulmetingen(L7)	Remshalden (H14)
Zitiert	Hötzl 1990	Hötzl 1990
Gutachter	Wasser-Müller	Inst. Dr. Jungbauer u. Partner
Schadstoff	PER; TRI; CIS; VC	PER; 1,1,1-TRI ; DCM; aromatische KW
Brunnenbauart	m.T./m.P	o.T; o.P.
Brunnen-Durchmesser	600 mm / DN400	/DN400
wirks. Brunnenlänge	4,53 m	k.A.
oberer Filter	1,20 m	
unterer Filter	1,20 m	
Bodenart	schluffige Kiese und Sande	
$k_f$ - Wert	$2 - 4 \cdot 10^{-3}$ m/s	
Förderleistung		
Eintragungsort	bekannt	bekannt
Voruntersuchung	ja	
Messungen	ja	nein
Konz. v. Sanierung	>1.000µg/l Summe CKW >1.000.000 µg/m <sup>3</sup>	5.800 µg/l PER >100.000 µg/m <sup>3</sup>
Sanierungsziel		
Konz. n. Abschluß	Vorhanden, ca. 60 kg i.d. Fahne	
Schadstoffaustrag	>2.000 kg, davon 22 kg UVB	270 kg,davon 4,4 kg UVB
Abluft		127 m <sup>3</sup> /h
Bodenluftanteil		
Temperatur		
Feuchte		
Betrieb von – bis	24.11.1987 – UVB in der Fahne	05.09.1988 – 3 Monate
Besonderheiten	Kombination aus Sanierungsbrunnen, Stripanlage (beides nicht mehr in Betrieb); Luftabsaugung u. UVB; Hinweis auf Verockerung, Verlagerung der Verschmutzung wird nicht ausgeschlossen; gutes Meßnetz	Kombination aus Sanierungsbrunnen (zur Probe), Luftabsaugung und UVBs; Änderungen des GW-Chemismus durch UVB

**Blatt 12**

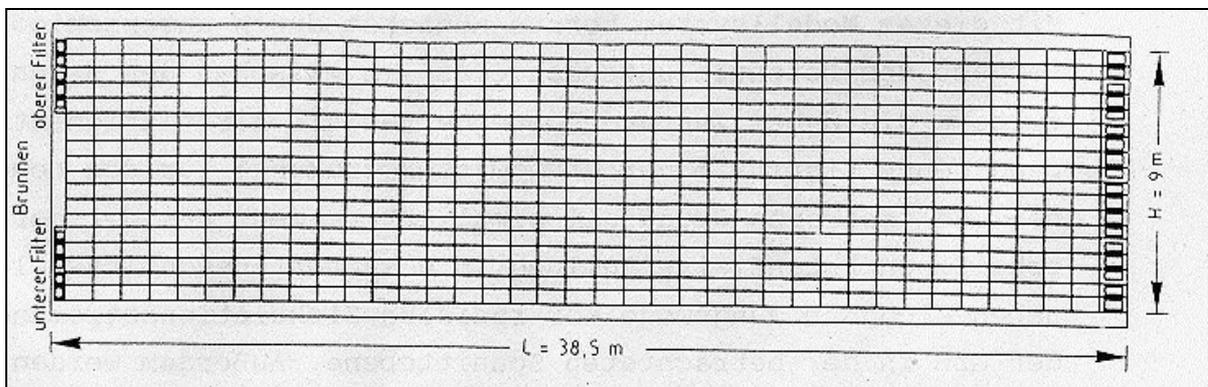
<b>Projekt</b>	<b>Käfertal (H15 / L4)</b>	<b>Hettingen (H16)</b>
Zitiert	Hötzl 1990	Hötzl 1990
Gutachter	---	Harreß Geotechnik
Schadstoff	PER; TRI; 1,1,1-TRI; CIS	PER; TRI; 1,1,1-TRI; CIS, VC
Brunnenbauart	o.P. /o.T. / m.P. /m.T.	m.P.; m.T.
Brunnen-Durchmesser	DN400	630 mm /DN400
wirks. Brunnenlänge	30,0 m	4,25 m 2,20 m 2,05 m
oberer Filter	5,5 m	1,00 m 1,00 m 1,00 m
unterer Filter	3,0 m	1,00 m 1,00 m 0,85 m
Bodenart	Mittelsand	Sand, Kies
$k_f$ - Wert	$1 \cdot 10^{-3}$ m/s	gering
Förderleistung	1 $10^3$ m/s	
Eintragungsort	unbekannt	bekannt
Voruntersuchung	ja	ja
Messungen		k.A.
Konz. v. Sanierung	500 $\mu$ g/l in der Fahne im OGWL	100.000 $\mu$ g/l (Schöpfproben)
Sanierungsziel		
Konz. n. Abschluß	vorhanden,	
Schadstoffaustrag	1,7 kg	137 kg UVB
Abluft	500 m <sup>3</sup> /h	
Bodenluftanteil	76 %	
Temperatur		
Feuchte		
Betrieb von – bis	12.01.1989 -	12.01.1989
Besonderheiten	Unvollständige Trennung von oberem und mittlerem Grundwasserleiter. Kombination von Sanierungsbrunnen Luftabsaugung und UVB: Verockerung; vorher Linkslauf	Kombination aus nachträglicher Luftabsaugung und UVB. Verockerung

## Anlage 2: Untersuchungen mit einem numerischen Modell

### 1. Modellaufbau - Untersuchungsvarianten

Das angeführte einfache aber doch sehr leistungsfähige Modellsystem wurde zunächst zur Aufstellung eines vertikalen Schnittes des Untergrundes im Umkreis eines GZB verwendet. Dabei muß einerseits vorausgesetzt werden, daß der Untergrundaufbau im gesamten Umkreis des Brunnens völlig gleich ist dem, der im betrachteten Schnitt vorgegeben ist. Andererseits ist die Strömungsberechnung nur unter Annahme gespannter Grundwasserbedingungen leicht durchführbar, wie sie auch den veröffentlichten Untersuchungen zugrundelagen und wegen der geringen Abweichungen gegenüber dem unter Umständen naturnäheren Fall mit freier Grundwasseroberfläche durchaus vertretbar ist.

Das vorliegende Modell wurde gemäß Abbildung 1 als vertikaler Ausschnitt des radialen Zustrombereiches eines GZB dargestellt. Die Ausdehnung in Radialrichtung beträgt dabei 38,5 m, in der Vertikalen 9 m (innerhalb der dichten Ränder). Die Rasterung erfolgt in Radialrichtung in 1 m-Schritten, in Vertikalrichtung in 0,5 m-Schritten.



**Abb. 1: Aufbau des vertikalen Modellsystems**

Im dargestellten Grundaufbau des Brunnens (am linken Modellrand) wurden symmetrische Verhältnisse gewählt, wobei die am oberen und unteren Ende angeordneten Filterstrecken jeweils eine Länge von 2,5 m aufweisen, das bedeutet im Verhältnis zur erfaßten Gesamthöhe von  $H = 9$  m ein Filterlängenverhältnis von  $q/H = 0,28$ . Die Radialausdehnung des Modellausschnittes erfaßt den Bereich  $L/H = 4,3$ .

Die Berechnungsvorgaben des Modells beinhalteten zunächst am rechten Rand ein konstantes Potential, demgegenüber in den Filterstrecken des Brunnens jeweils oben eine konstante Erhöhung  $h/2$  und unten eine entsprechende Abminderung  $h/2$  angesetzt wurden. Damit ergibt sich im Brunnen ein Potentialunterschied von  $h$  zwischen unterem und oberem Filter, der maßgebend für die Höhe des Durchflusses ist. Die wirksame Untergrunddurchlässigkeit wur-

de im Ausgangsfall mit  $k_f = 0,001$  m/s angesetzt, was einem gut durchlässigen Kies-Sand-Untergrund entspricht. Der Radialeinfluß auf die Strömung wurde durch eine kontinuierliche Abnahme der Dicke des nachgebildeten Schnittes vom rechten Rand bis zum Brunnen am linken Rand nachgebildet, wobei dieser Keilausschnitt einen Winkel von  $5^\circ$  darstellt, d.h.  $1/72$  des gesamten Umkreises.

Mit diesem Modellsystem konnte zunächst durch unterschiedliche Vorgabe des Potentialunterschiedes  $h$  zwischen den Brunnenfiltern die dabei zustandekommende radiale Zirkulationsströmung (ohne Einfluß einer Grundwasserströmung) für den homogenen und isotropen Grundfall simuliert werden. Aus der daraus erhaltenen Potentialverteilung im gesamten Ausschnittsfeld ergeben sich Strömungswege der radialen Zirkulationsströmung um den GZB in der betrachteten Schnittebene. Außerdem werden mit dem Modellsystem auch die am Brunnen aus- und eintretenden Wassermengenanteile je Zelle der Brunnenfilter (bei der Rasterteilung des verwendeten Systems jeweils 5 Abschnitte pro Filter) sowie die längs der jeweils betrachteten Strömungswege maßgebenden Fließzeiten des Wassers vom Brunnenaustritt bis zum Wiedereintritt ermittelt, wobei ein durchflußwirksamer Porenanteil von 20 % vorgegeben wurde. Längs der Strömungswege erfolgt außerdem eine Markierung von Fließzeitabständen, die in den vorliegenden Untersuchungen jeweils mit 2 Tagen festgelegt wurden.

In Variation der Bedingungen erfolgte ausgehend vom homogenen und isotropen **Grundfall 1** zunächst die Untersuchung von **Fall 2**, bei dem im gesamten Grundwasserleiter eine einheitliche Anisotropie zugrundegelegt wurde, bei der die Untergrunddurchlässigkeit in horizontaler Richtung  $k_H$  fünffach höher war als die Vertikaldurchlässigkeit  $k_V$ , also  $k_H = 5 k_V$ .

In einem **Fall 3** wurde dagegen ausgehend vom Grundfall 1 bei sonst isotropen Bedingungen in mittlerer Höhe des Grundwasserleiters eine horizontale Schichtung mit einer verringerten Durchlässigkeit  $k'$  gegenüber dem übrigen Bereich angenommen mit der Größe  $k' = 0,1 k$ . Die Dicke der Zwischenschicht beträgt  $d = 0,22 H$ .

Im nächsten **Fall 4** wurde in Erweiterung des Falles 3 zusätzlich eine Gesamtanisotropie im Grundwasserleiter von  $k_H = 5 k_V$  angenommen.

Es folgte **Fall 5**, bei dem sich gegenüber Fall 3 die Zwischenschicht nur bis in einem Abstand  $L' = 2 H$  vom Brunnen erstreckt, aber dafür eine geringere Durchlässigkeit aufweist als in Fall 3 ( $k' = 0,01 k$ ). In diesem Fall wäre demgemäß der Brunnen durch eine am Standort vorhandene dichtere Linse begrenzter Ausdehnung geteufte, was zumindest den prinzipiellen Einfluß einer solchen bereichsweisen Inhomogenität erkennbar macht.

Im **Fall 6** wurde entsprechend der übrigen Systematik vorausgesetzt, daß im gesamten Grundwasserleiter wiederum zusätzlich zu der vorhandenen dichten Linse auch noch eine Anisotropie von  $k_H = 5 k_V$  vorliegt.

Die beschriebenen und untersuchten Varianten stellen natürlich keinesfalls einen repräsentativen Querschnitt von in Natur möglichen Situationen des Untergrundaufbaues dar, was auch beim angewandten einfachen Rechensystem nicht möglich wäre. Dagegen erscheint eine solche Auswahl doch geeignet, gewisse Haupteinflüsse des Untergrundaufbaues auf die Strömungsvorgänge im Bereich eines GZB zu veranschaulichen. Daraus feststellbare Charakteristiken sind in gewissem Maß geeignet, in Natur auftretende zunächst nicht erklärbare Anoma-

lien bei den Strömungs- und Stoffausbreitungsvorgängen etwas besser interpretieren zu können und so einen Schritt weiter zu kommen bei der Beurteilung der Wirkungsweise des GZB.

In der weiteren Untersuchung war festzustellen, welche Änderungen der Strömungsvorgänge im Bereich eines GZB gegenüber dem einfachen Ausgangsfall radialsymmetrischer Strömung durch Überlagerung mit einem gleichmäßigen Grundwasserstrom zustandekommen, da erst dieser Fall als näherungsweise naturgerecht anzusehen ist.

Zu diesem Zweck wurden die berechneten Potentialverteilungen mit einer im gesamten Feld herrschenden parallelen Grundwasserströmung überlagert, wobei der verwendete Vertikal-schnitt in diesem Fall die Projektion der Vorgänge im Zustrombereich des Brunnens (Grundwasserstrom von rechts nach links) wiedergibt.

Die Überlagerung kann selbstverständlich auch für jeden parallel dazu verlaufenden Vertikal-schnitt wiedergegeben werden, was aber wegen der räumlich verlaufenden Strömung nicht anschaulich ist. Prinzipiell erfolgt die Überlagerungsrechnung für einen dreidimensionalen Raum im Umkreis des Brunnens und kann daher auch in entsprechender räumlicher Form dargestellt werden wie dies für Grundfälle z.B. in /18/ erfolgt ist. In Abbildung 2 ist für die Ausgangsfälle des homogenen Grundwasserleiters ohne und mit Anisotropie beispielhaft der räumliche Zustrombereich aus einem Grundwasserstrom zu einem GZB dargestellt. Man erkennt dabei die maßgebenden Charakteristiken mit seitlicher Abflachung des erfaßten Zu-strömkörpers und mit der durch die überlagernde Zirkulationsströmung im Nahbereich des Brunnens erzeugten Eintiefung der Zustromfigur.

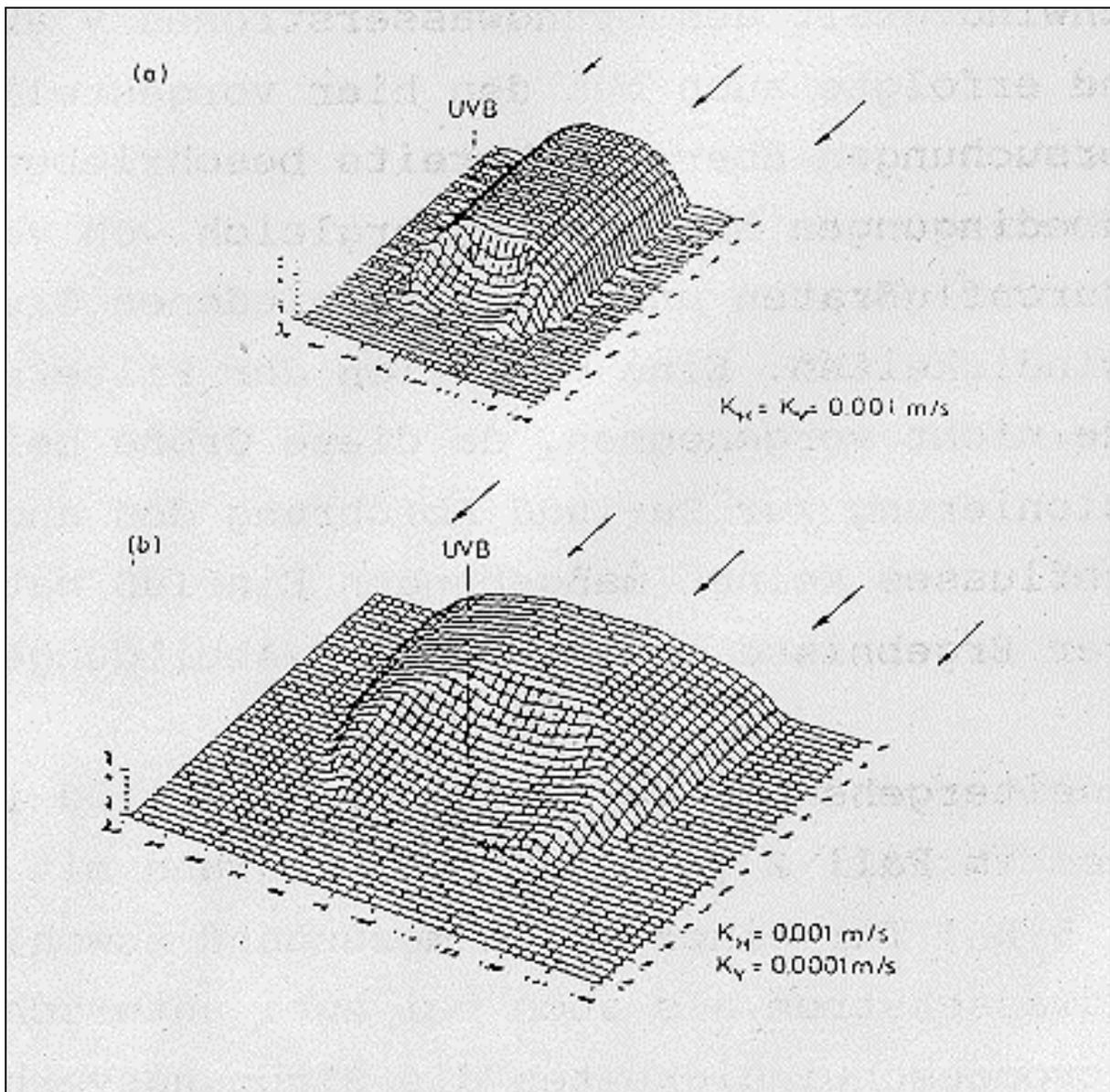


Abb. 2: Abgrenzung des Zustrombereiches zu einem GZB im natürlichen Grundwasserstrom mit und ohne Anisotropie der Untergrunddurchlässigkeit (aus /18/)

## 2. Ergebnisse der Untersuchungen

Nachfolgend sind für die verschiedenen Untersuchungsfälle jeweils die ermittelten Strömungsverteilungen im Zustromlängsschnitt durch den GZB dargestellt und zwar in der Form, daß immer dem Ausgangsfall ohne Grundwasserstrom der Überlagerungsfall mit Grundwasserstrom gegenüber gestellt ist. Bereits aus den früher veröffentlichten Berechnungsergebnissen (z.B. in /18/) geht gemäß Abbildung 3 hervor, daß der Anteil des vom Brunnen erfaßten Grundwasserzustromes  $Q_0$  außer von den Untergrundbedingungen sowohl vom Gesamtdurchfluß im Brunnen  $Q$  (einschließlich des Zirkulationsanteils) als auch von der Filtergeschwindigkeit des Grundwasserstromes  $V$  abhängt. Dementsprechend erfolgte auch bei den hier vorgestellten zusätzlichen Untersuchungen über die bereits beschriebene Variation von Randbedingungen hinaus ein Vergleich von verschiedenen Brunnendurchflußraten und von verschiedenen Grundwasserstromgeschwindigkeiten. Eine Variation der Filterstreckenlängen  $a$  wurde nicht vorgenommen, da diese Größe bei ausreichender Dimensionierung zur Zu- und Abführung des angesetzten Brunnendurchflusses keinen maßgebenden Einfluß hat. Die Darstellung dieser Ergebnisse erfolgt in den Abbildungen 4 bis 11.

Zur weitergehenden Veranschaulichung sind in Abbildung 12 außerdem im **Fall 2** (homogener Untergrund mit Anisotropie  $k_H = 5 k_V$ ) für einen Entnahmestand sowohl bei fehlendem Grundwasserstrom als auch bei zwei unterschiedlichen Grundwasserstromgeschwindigkeiten die Strömungsverhältnisse im Gesamtbereich des Längsschnittes durch den Brunnen (im Oberstrom und im Unterstrom) dargestellt.

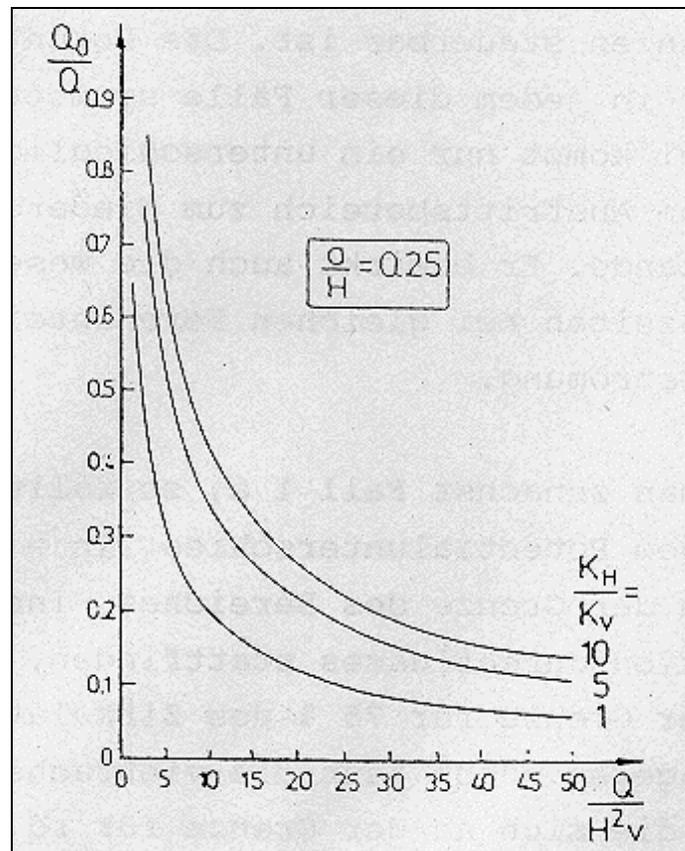


Abb. 3: Anteil des oberstromigen Brunnenzuflusses am Gesamtdurchfluß im GZB (aus /18/)

Bei einem Blick auf Abbildung 4 mit den Ergebnisdarstellungen der Varianten im **Grundfall 1** ist zunächst erkennbar, daß erwartungsgemäß die Strömungswege der beiden Zustände ohne Grundwasserstrom a) und c) völlig übereinstimmen, obwohl der Brunnendurchsatz im **Fall 1a)** rd.  $24,35 \text{ m}^3/\text{h}$  und im **Fall 1c)** rd.  $114,50 \text{ m}^3/\text{h}$  betragen. Allerdings unterscheiden sich die Fließzeiten längs der jeweils für die Abgrenzung der gleichen Zirkulationsströmungsanteile dargestellten Fließwege erheblich. Dies ist dadurch bedingt, daß ein höherer Brunnendurchsatz nur einen entsprechend höheren Druckunterschied zwischen oberem und unterem Filterbereich des Brunnens erfordert, der durch eine Pumpe bzw. entsprechende Luftabsaugung innerhalb gewisser Grenzen steuerbar ist. Das Potentialfeld um den Brunnen ist aber in jedem dieser Fälle symmetrisch und gleich aufgebaut. Dabei kommt nur ein unterschiedlich schneller Potentialabbau vom Austrittsbereich zum Wiedereintrittsbereich am Brunnen zustande. Er bewirkt auch die wesentlich unterschiedlichen Fließzeiten bei gleichen Porenanteilen an der Gesamtzirkulationsströmung.

Betrachtet man zunächst **Fall 1a)** so fällt auf, daß in diesem Fall bei einem Potentialunterschied  $h = 2 \text{ m}$  im Brunnen die Fließzeit an der Grenze des Bereiches, innerhalb dem rd. 50 % des Zirkulationsdurchflusses stattfinden, nur 0,3 Tage beträgt. An der Grenze für 75 % des Zirkulationsdurchflusses ergibt sich dagegen schon fast die vierfache Fließzeit von 1,12 Tagen, die sich an der Grenze für rd. 87 % des Durchflusses bereits auf 3,7 Tage erhöht hat. Bis zu der als Grenze des Zirkulationsbereiches definierbaren Linie mit 98 % des Durchflusses wächst die Fließzeit sogar auf 28,3 Tage an. Man erkennt daraus die außerordentliche Ungleichmäßigkeit der Durchströmung des Zirkulationsbereiches. Sie hat natürlich zur Folge, daß im Bereich eines Radius  $r < H$ , in dem noch rd. 10 % des Zirkulationsstromes fließen, bereits sehr geringe Fließgeschwindigkeiten auftreten. Dies läßt sich auch aus den eng aneinandergereihten Fließzeitmarkierungspfeilen auf der 98 %-Linie feststellen. Sie geben jeweils die Abstände für zwei Tage Fließzeit an. Man erkennt außerdem, daß die geringste Geschwindigkeit jeweils im Bereich mit weitgehend vertikaler Strömung vorherrscht. Das bedeutet, daß zumindest im äußeren Bereich trotz isotroper Bedingungen die Transportmöglichkeiten in vertikaler Richtung nicht sehr ausgeprägt sind.

Die Verhältnisse im **Fall 1c)** sind entsprechend dem wesentlich höheren Brunnendurchsatz, der durch einen brunneninneren Potentialunterschied von rd. 8,5 m erzeugt wurde, proportional. Dieser hohe Brunnendurchfluß setzt natürlich einen entsprechenden Ausbau des Brunnens und dessen entsprechende Ausrüstung voraus. Allerdings ist hier nicht berücksichtigt, ob bei diesem Durchsatz noch eine ausreichende Gasabscheidung im Brunnen möglich ist. Da der in praktischen Fällen gemessene Brunnendurchsatz im allgemeinen deutlich geringer war, wurden auch die weiteren Fälle nicht mehr mit derart hohem Durchsatz untersucht.

Gerade im **Fall 1** (in Abbildung 4 dargestellt) erschien es auch angebracht, solche Extremverhältnisse zu untersuchen, da bei einem homogenen Grundwasserleiter entsprechend hoher Durchlässigkeit auch höhere Brunnenleistungen üblich sind.

Entsprechend wurde auch die Überlagerung in diesem Fall nur mit dem Grundwasserstrom höherer Geschwindigkeit mit  $v_f = 0,86 \text{ m/d}$  vorgenommen, das bedeutet ein Grundwassergefälle von 1 %.

Auf den Teilbildern b) und d) sind die Überlagerungsfälle für den Brunnenzustrom wiedergegeben. Deutlich kann man den Einfluß des höheren Brunnendurchsatzes in einem weiterrei-

chenden Zirkulationsbereich als bei geringerem Durchsatz erkennen. Dies wird durch den *Abstand des Staupunktes vom Brunnen* gekennzeichnet, der im Fall geringen Brunnendurchsatzes mit  $S = 0,83 H$  wesentlich geringer ist als bei großem Durchsatz ( $S = 1,15 H$ ).

Zu den Strömungsdarstellungen mit Grundwasserstrom ist noch anzumerken, daß hier nur die Verhältnisse im Längsschnitt durch den Brunnen wiedergegeben werden können. Im Überlagerungsfall herrschen im Gegensatz zum Ausgangsfall ohne Grundwasserstrom keine radialsymmetrischen Bedingungen mehr um den Brunnen. Insofern stellen auch die ermittelten Strömungswege zwar echte Konturen in diesem Schnitt dar, sie betreffen aber bei der Zirkulationsströmung nur die Fließkomponenten in dieser Ebene und gelten im Umfeld nicht mehr wie im radialsymmetrischen Ausgangsfall für die anteiligen Austrittsmengen am oberen Brunnenfilterbereich. Da diese Austrittsanteile aber direkt am Brunnen noch gelten, sind sie dort eingetragen. Im Überlagerungsfall findet ein ausgeprägter seitlicher Abstrom der Zirkulationsströmung (Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zur Betrachtungsebene) um den Brunnen herum statt mit Haupteinströmung im Unterstrom. Dabei bewegen sich auf den ermittelten Fließwegen im Längsschnitt wesentlich geringere Anteile allerdings auch mit wesentlich verkürzten Fließzeiten gegenüber dem Ausgangsfall. Wie stark die Verlagerung des Zirkulationsabflusses ist, läßt sich gut in der geringeren Erfassung dieses direkten Zustromes im unteren Filterbereich für diesen Schnitt erkennen. Man kann gut sehen, daß dieser Effekt vor allem beim starken Einfluß des Grundwasserstromes im Fall geringen Brunnendurchsatzes wirksam wird (Abbildung 4 b)). Allerdings ist zu berücksichtigen, daß die Verhältnisse im zentralen Längsschnitt durch den Brunnen beim Grundwasserzustrom zum Brunnen den Bereich des höchsten Einflusses und bei der Zirkulationsströmung den Bereich der stärksten Abdrängung veranschaulichen.

Auf Abbildung 5 sind die Verhältnisse im **Fall 2** dargestellt, bei dem im Gegensatz zu Fall 1 eine Gesamtanisotropie im Grundwasserbereich von  $k_H = 5 k_V$  zugrundegelegt ist.

Besonders auffällig ist zunächst im Ausgangsfall ohne Grundwasserstrom (Teilbild a)) die außerordentlich weiterreichende Zirkulationsströmung bei gleichem Brunnendurchsatz wie im Fall 1 a) von rd.  $24,35 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dieser kommt dabei durch einen Potentialunterschied im Brunnen von  $h = 2,6 \text{ m}$  zustande. Wegen des höheren Gesamtwiderstandes im Grundwasserbereich bei anisotropen Bedingungen ist somit eine entsprechende Potentialerhöhung erforderlich.

Das Bild der Strömungswege und Fließzeiten im Ausgangsfall 2 a) läßt bei etwa gleicher Aufteilung der Linien nach Abflußbeträgen erkennen, daß wesentlich längere Fließzeiten und geringere Fließgeschwindigkeiten vorherrschen als im Grundfall. Schon an der Begrenzung für rd. 48 % des gesamten Zirkulationsabstromes liegt die Fließzeit bei 1,5 Tagen gegenüber 0,3 Tagen im Fall 1 a). Man erkennt generell, daß etwa fünffache Fließzeiten zustandekommen. Dies wiederum macht deutlich, daß die maßgebenden Zeitanteile für die vertikale Strömung benötigt werden, die in diesem Fall einen fünffach erhöhten Widerstand zu überwinden hat.

Charakteristisch für den Anisotropieeinfluß ist andererseits auch die Erhöhung der Gesamtreichweite der Zirkulationsströmung auf einen Abstand  $R = 3,5 H$  gegenüber  $R = 1,5 H$  beim isotropen Fall.

Die Überlagerung mit einer Grundwasserströmung bringt auch in diesem Fall je nach Stärke der Zuströmung eine wesentliche Zurückdrängung der Zirkulation im Zuflußlängsschnitt. Auch für diese Fälle 5 b) und c) gelten die vorangegangenen Aussagen hinsichtlich der Zirkulationsabflüsse und Fließzeiten im Längsschnitt. Man sieht, daß besonders bei starkem Grundwasserstrom eine ausgeprägte Verdrängung des Zuflusses am unteren Brunnenfilter erfolgt, der im Zentralschnitt bereits zu etwa  $2/3$  durch Zustrom aus dem Grundwasserstrom beaufschlagt ist. Dies hat aber keine Bedeutung für einen entsprechend hohen Gesamtanteil am Brunnendurchsatz, da es sich nur um die Verhältnisse im Brunnenlängsschnitt handelt. Ein Blick auf das in /18/ veröffentlichte Diagramm des Zusammenhanges zwischen dem Brunnendurchfluß und dem Anteil aus dem Grundwasserzustrom ergibt für entsprechende Anisotropie und die zugrundeliegenden Bedingungen ( $Q = 24,35 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $H = 9 \text{ m}$ ,  $v_f = 0,3 \text{ m/d}$ ) bei schwächerem Grundwasserzustrom einen Anteil des Grundwasserstromes im Brunnendurchfluß in der Größe von rd. 20 % und bei starkem Grundwasserzustrom von rd. 40 %, wobei dieser letzte Wert schon als sehr hoch anzusehen ist. Die aus den Strömungsbildern erhaltenen Staupunktlagen von  $S = 1,37 H$  bei starkem Grundwasserstrom und  $S = 1,92 H$  bei schwächerem Grundwasserzustrom stimmen sehr gut mit dem in /18/ veröffentlichten Diagramm überein, was die Vergleichbarkeit der Berechnungen beweist.

Auf Abbildung 6 ist zum weitergehenden Vergleich noch der entsprechende **Fall 2** des homogenen und anisotropen Grundwasserleiters für einen höheren Brunnendurchsatz von rd.  $46,60 \text{ m}^3/\text{h}$  dargestellt.

Dieser durchaus noch vertretbare höhere Durchsatz ist auch bei weiteren Fällen jeweils dem niedrigeren Betrag gegenübergestellt. Das obere Teilbild läßt wieder die Übereinstimmung der Strömungsverteilung im Ausgangsfall ohne Grundwasserstrom bei unterschiedlichem Brunnendurchsatz erkennen. Lediglich die Fließzeiten längs der entsprechenden Wege sind wiederum proportional geringer, wenn auch das uneinheitliche Verteilungsbild erhalten bleibt.

Die beiden unteren Teilbilder mit Grundwasserstrom zeigen deutlich, daß der Rückstauereffekt der Zirkulationsströmung gegen den Grundwasserzufluß bei höherem Brunnendurchsatz stärker ist. Dies ist einerseits aus den Staupunktständen von  $S = 2,28 H$  bei schwächerem Grundwasserzustrom und  $S = 1,70 H$  beim stärkeren Zustrom ersichtlich (gegenüber  $S = 1,37 H$  und  $S = 1,92 H$  bei geringerem Brunnendurchsatz). Andererseits weist dies auch der deutlich geringere Anteil der Beaufschlagung des unteren Filterbereiches durch den Grundwasserzustrom aus.

Die bis hierher wiedergegebenen Fälle stellen lediglich Veranschaulichungen von Situationen dar, wie sie bereits anderweitig untersucht und in umfangreichem Maß durch Diagramm-Darstellungen der Abhängigkeiten belegt sind (z.B. in /18/). Insofern ist zunächst nachweisbar, daß die Untersuchungen mit vergleichbaren Randbedingungen aber unterschiedlichen Rechenmodellen zu übereinstimmenden Ergebnissen führten, was wegen der eindeutigen Randbedingungen dieser Berechnungen eigentlich zu erwarten war.

Außer einer zusätzlich erzielten Veranschaulichung dieser Vorgänge gegenüber den bisherigen Veröffentlichungen infolge ihrer vergleichbaren Gegenüberstellung sollen sie vor allem auch zu einem direkten Vergleich mit den weiter untersuchten bisher nicht veranschaulichten Situationen dienen.

Auf den Abbildungen 7 und 8 ist zunächst direkt vergleichbar zu den vorangegangenen Abbildungen **Fall 3** der Untersuchung dargestellt. Bei diesem liegt eine geringer durchlässige horizontale Zwischenschicht der Dicke  $d = 0,22 H$  und der Durchlässigkeit  $k' = 0,1 k$  in der mittleren Schritthöhe durchgehend vor.

Im Ausgangsfall ohne Grundwasserstrom mit einem Brunnendurchsatz von  $24,30 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teilbild 7 a)) erkennt man im Vergleich zum Fall 1 mit entsprechendem Brunnendurchsatz (Teilbild 4 a)) wie ausgeprägt sich die Zwischenschicht mit noch relativ guter Durchlässigkeit bereits auf die Zirkulationsströmung auswirkt. Der Effekt ist weitgehend ähnlich dem einer Anisotropie von 1:5 (Fall 2 in Abbildung 5 a)), obwohl die Zwischenschicht bei einer Dicke von  $0,22 H$  und einer 10-fach geringeren Durchlässigkeit allenfalls den doppelten Widerstand ausüben sollte. Tatsächlich zeigt sich hier die bereits vorher festgestellte Tatsache, daß die Vertikalströmung bei der Zirkulation den maßgebenden Anteil bei der Fließzeit ausmacht. Nahezu gleich sind demgemäß außer den Fließwegen entsprechender Anteilmengen auch die Fließzeiten.

Betrachtet man die Veränderungen bei Vorliegen einer Grundwasserströmung, so werden allerdings schon andere Auswirkungen des hydrogeologischen Einflusses einer Zwischenschicht erkennbar. Auf den Teilbildern 7 b) und c) wird zunächst für den geringeren Brunnendurchsatz von  $Q = 24,30 \text{ m}^3/\text{h}$  ersichtlich, daß die Zurückdrängung der Zirkulationsströmung stärker ist als im Vergleichsfall 2. Der Staupunktabstand liegt jetzt für den schwächeren Grundwasserzustrom bei  $1,78 H$  gegenüber  $1,92 H$  im Vergleichsfall. Entsprechendes gilt für stärkeren Grundwasserzustrom mit einem Staupunktabstand von  $S = 1,21 H$  gegenüber  $1,37 H$  im Vergleichsfall.

Ganz entsprechend verhält es sich im Fall größeren Brunnendurchsatzes im Vergleich zum entsprechenden Anisotropiefall 2. Die Staupunkte verschieben sich dabei (Teilbilder 8 b) und c)) auf  $S = 2,13 H$  gegenüber  $2,28 H$  im Vergleichsfall bei schwächerem Grundwasserzustrom und  $S = 1,57 H$  gegenüber  $1,70 H$  im Vergleichsfall.

Andererseits ist bei den Fällen mit Zwischenschicht trotz kürzerer Staupunktabstände eine durchweg geringere anteilige Beaufschlagung der unteren Filterstrecke im Zentralschnitt gegenüber dem Vergleichsfall 2 (Abbildung 5) festzustellen. Außerdem verläuft die Grenze zwischen Grundwasserzustrom und Zirkulationsströmung vom Staupunkt aus nahezu vertikal bis unterhalb der Zwischenschicht. Offensichtlich hat die durchgehende Zwischenschicht einen verstärkten Rückstauwirkung auf die Grundwasserzuflutung oberhalb der Schicht. Diese muß deswegen die Zirkulationsströmung weiter zurückdrängen, um durch die Schicht in den unteren Bereich eindringen zu können. Dadurch kommt eine geringere Beaufschlagung des Brunnens mit Grundwasserzustrom zustande, die sich vor allem auch auf den Zustrom von oberhalb der Zwischenschicht bemerkbar macht. Gegenüber dem Anisotropiefall 2 ohne Zwischenschicht treten allerdings nur geringe Unterschiede auf, wie auch aus den sehr ähnlichen Anströmzeiten des Grundwasserzustromes in beiden Fällen hervorgeht.

Auf Abbildung 9 ist zum weiteren Vergleich auch noch als **Fall 4** der Zustand mit Zwischenschicht und zusätzlicher Gesamtanisotropie von  $k_H = 5 k_V$  für geringen Brunnendurchsatz  $Q = 24,30 \text{ m}^3/\text{h}$  untersucht.

Im Ausgangsfall ohne Grundwasserstrom ist die ausgeprägte Anisotropiewirkung schon daran erkennbar, daß nur noch rd. 75 % der Zirkulationsströmung innerhalb des abgegrenzten Modellbereiches von  $L = 4 H$  stattfinden. Gegenüber dem Vergleichsfall ohne Anisotropie (Abbildung 7 a)) ist die Fließzeit an diesem Grenzbereich bei gleichem Brunnendurchsatz auf rd. 55 Tage gegenüber vorher rd. 4,5 Tage angewachsen.

Bei der Überlagerung mit der Grundwasserströmung tritt aber in diesem Fall mit Anisotropie ein interessanter und wichtiger Effekt auf:

Der Staupunkt wandert bei schwächerem Grundwasserstrom weit ins Oberwasser bis zu einem Abstand  $S = 3,2 H$  gegenüber  $S = 1,78 H$  im Vergleichsfall ohne Anisotropie. Bei stärkerem Grundwasserstrom findet immer noch ein Rückstau bis  $S = 1,91 H$  statt gegenüber  $S = 1,21 H$  ohne Anisotropie. Gleichzeitig wird aber die Beaufschlagung der unteren Filterstrecke durch den Grundwasserzustrom erkennbar an den deutlich geringeren Zuflußzeiten im Bereich unterhalb der Zwischenschicht. Dabei verlängern sich die Zuflußzeiten von rechts im Bereich oberhalb der Zwischenschicht ebenso deutlich gegenüber dem Vergleichsfall.

Als Fazit ist festzustellen, daß bei dieser Doppelwirkung von durchgehend dichterem Zwischenschicht und Gesamtanisotropie im Grundwasserleiter der Einfluß des oberhalb der Zwischenschicht anströmenden Grundwassers zurückgeht und der des unterhalb zuströmenden Grundwassers zunimmt, wobei sich der Gesamteffekt des Grundwasserzuflusses sogar erhöht. Dies gilt sogar im Vergleich zum Fall ohne Zwischenschicht aber mit Anisotropie auf Abbildung 5 b) und c).

Man kann feststellen, daß im unteren Bereich sowohl die Fließzeiten vom rechten Rand kürzer sind als im Fall ohne Zwischenschicht, als auch daß die Beaufschlagung der unteren Filterstrecke des Brunnens im Zentralschnitt zunimmt. Gleichzeitig erfolgt allerdings vom Bereich oberhalb der Zwischenschicht ein geringerer Zufluß, was auch durch das Rückwandern der Staupunkte belegt ist. Auf jeden Fall gilt unter diesen Bedingungen der für den Fall ohne Zwischenschicht maßgebende Zusammenhang zwischen Staupunktentfernung und Grundwasserstromzuflußanteil nicht in gleicher Weise.

Eine weitere Variantenuntersuchung im **Fall 5** galt einem Sonderfall. Dabei wird angenommen, daß im Grundwasserleiter zwar keine durchgehende Zwischenschicht geringerer Durchlässigkeit vorliegt, dafür aber im Brunnenbereich in entsprechender Tiefe und Dicke eine dichtere Linse ansteht, die sich bis in einen Abstand von  $L = 2 H$  allseitig vom Brunnen ausbreitet. Die Durchlässigkeit dieser Linse wurde noch vermindert gegenüber der vorherigen durchgehenden Zwischenschicht auf einen Betrag von  $k' = 0,01 k$ . Im übrigen Grundwasserleiter werden in diesem Fall isotrope Verhältnisse vorausgesetzt.

Der Fall mit einer dichteren Linse kann zwar mit dem verfügbaren Modellsystem nur zentral-symmetrisch untersucht werden, d.h. mit einer Linse im Brunnenbereich und gleicher Art und Ausdehnung nach allen Richtungen. Trotzdem kann er zumindest Hinweise geben auf den Einfluß solcher in Natur häufig vorkommenden Anomalien. Eine differenzierte Untersuchung solcher Einflüsse mit unterschiedlichen Linsen bzw. Durchlässigkeiten in verschiedenen Bereichen des Brunneneinzugsgebietes würde allerdings den Einsatz eines detaillierten dreidimensionalen Modellsystems erfordern, was im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht sinnvoll erschien.

Auf Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Untersuchung des isotropen Grundfalles mit dichter Linse im Brunnenbereich in entsprechender Weise wie bei den vorangegangenen Fällen veranschaulicht.

Auf dem oberen Teilbild a) der Abbildung 10 ist zunächst wieder der radialsymmetrische Strömungsfall ohne Grundwasserstrom dargestellt. Im Vergleich zum Grundfall 1 auf Abbildung 4 wird der Einfluß der dichteren Linse bei sonst gleichen Bedingungen sehr deutlich erkennbar. Infolge des hohen Widerstandes der Linse gegen eine Durchsickerung stellt sich ihre fast vollständige Umströmung durch die Zirkulationsströmung ein. Dies führt einerseits zu wesentlich längeren Fließzeiten (bei der Grenze für rd. 48 % des Gesamtflusses statt 0,3 Tagen jetzt rd. 3,5 Tage) andererseits aber auch zu einer räumlichen Zusammendrängung des Bereiches von rd. 50 % bis 98 % des Zirkulationsdurchflusses. Dadurch kommt es zumindest direkt hinter der Linse zu einer intensiveren Durchspülung. Außerdem wird, wenn auch mit längeren Fließzeiten, ein günstiger Durchspülungseffekt mit recht gleichmäßiger Strömung oberhalb der Linse erreicht, wo üblicherweise in verstärktem Maße Kontaminationen vorliegen. Nachteilig ist jedoch der Transport dieser Stoffe in den Bereich unterhalb der Linse, weshalb gerade in solchen Sonderfällen ein umgekehrter Betrieb des GZB (von oben nach unten) vorteilhaft sein könnte.

Bei den Überlagerungen mit der Grundwasserströmung in den Teilbildern 10 b) und 10 c) sind prinzipiell gleiche Haupterscheinungen feststellbar. Auch hier liegt eine Zusammendrängung der Zirkulationsströmung auf den unmittelbaren Bereich nach Ende der Linse vor, die natürlich durch den Grundwasserzustrom noch verstärkt wird. Nachteilig ist dabei allerdings unter Umständen die mehr oder weniger starke Verlagerung der Zirkulationsströmung, die beispielsweise im Teilbild c) mit starkem Grundwasserzustrom im Betrachtungsschnitt selbst weitgehend unterbunden ist. Dies führt andererseits im Zentralbereich zu einer effektiveren Heranziehung von Grundwasserzustrom und damit gegebenenfalls zu einem erhöhten Gesamtwirkungsgrad, vor allem bei Anordnung in einer Kontaminationsfahne. Der relativ gleichmäßige Zustrom vom rechten Rand mit über die Tiefe ausgeglichenen Fließzeiten bestätigt dies und zeigt beim starken Grundwasserzustrom (Teilbild c)) im Vergleich zum isotropen Grundfall 1 sogar eine Verkürzung der Fließzeiten und erhöhte Beaufschlagung des unteren Filterbereiches. Die Staupunktabstände von  $S = 2,35 H$  bei schwächerem Grundwasserstrom und  $S = 2,02 H$  bei stärkerem Grundwasserstrom zeigen im Vergleich zum Grundfall 1 mit entsprechendem  $S = 0,83 H$  bei starkem Zustrom eine wesentliche Ausdehnung des Zirkulationsbereiches. Dies gilt auch noch im Vergleich zum anisotropen Fall 2, wo vergleichbare Stauweiten von  $S = 1,92 H$  und  $S = 1,37 H$  zustandekommen. Allerdings muß auch im vorliegenden Fall die Einschränkung gemacht werden, daß die Staupunktweite nicht unbedingt mit den Fällen ohne Zwischenschicht verglichen werden kann.

**Fall 6** betrifft das Vorliegen einer dichteren Linse bei zusätzlicher Voraussetzung einer Gesamtanisotropie im Grundwasserleiter von  $k_H = 5 k_V$ . Die Darstellungen auf Abbildung 11 zeigen erwartungsgemäß, daß dadurch eine Streckung des Zirkulationsbereiches eintritt, die wiederum zu einer ungleichmäßigeren und mehr auseinandergezogenen Zirkulationsströmung im radialsymmetrischen Fall führt.

In den untersuchten Überlagerungsfällen mit schwächerem Grundwasserzustrom (Teilbild 11 b) und 11 c)) erkennt man wiederum den ausgeprägten Einfluß der Grundwasserströmung auf die Zirkulationsströmung. Dabei macht sich im Teilbild b) bei schwächerem Grundwasser-

strom noch der zusätzliche Effekt der Anisotropie gegenüber dem isotropen Fall (Abbildung 10 b)) mit einer deutlich weiteren Abwanderung des Staupunktes stromaufwärts auf  $S = 2,94 H$  (gegenüber  $S = 2,35 H$  im isotropen Fall) bemerkbar. Dagegen tritt bei stärkerem Grundwasserstrom (Teilbild c)) nur noch eine geringfügige Staupunktverschiebung auf  $S = 2,23 H$  (gegenüber  $S = 2,0 H$  im isotropen Fall) auf, da in diesem Bereich der Einfluß der Linse überwiegt. Im letzten Zustand findet in diesem Längsschnitt auch entsprechend kaum noch eine Zirkulationsströmung statt, d.h. der untere Filterbereich wird hier voll von Grundwasserzustrom beaufschlagt. Dies bedeutet entsprechend wie bei Fall 5 c) auch bei Fall 6 c) eine intensive Erfassung des Grundwasserzustromes im Zentralbereich, deren Breitenauswirkung allerdings noch festzustellen ist, was im weiteren erfolgt.

Zur Verdeutlichung der Ergebnisse sind in Tafel 1 nochmals die untersuchten Fälle mit ihren Randbedingungen und als Ergebnismaßstab dem ermittelten Staupunktastand zusammengestellt.

Tafel 1: Zusammenstellung der Untersuchungsfälle

Fall	Charakteristiken	Brunnen- durchsatz m <sup>3</sup> /h	überlagerte Grundwasser- strömung mit vf (m/d)	ermittelter Staupunkt- abstand S / H	Ergebnis- darstel- lung in Anlage 2
1 a	homogener,	24,35	-	-	Abb. 4
b	isotroper	24,35	0,86	0,83	
c	GW-Leiter	114,45	-	-	
d		114,45	0,86	1,15	
2 a	homogener,	24,35	-	-	Abb. 5
b	anisotroper	24,35	0,30	1,92	
c	GW-Leiter ( $k_H = 5 k_V$ )	24,35	0,86	1,37	
2 d	homogener,	46,66	-	-	Abb. 6
e	anisotroper	46,66	0,30	2,28	
f	GW-Leiter ( $k_H = 5 k_V$ )	46,66	0,86	1,70	
3 a	isotrop, aber	24,30	-	-	Abb. 7
b	durchgehende	24,30	0,30	1,78	
c	Zwischenschicht. Dicke: 0,22 H $k_H' = 0,1 k_H$	24,30	0,86	1,21	
3 d	isotrop, aber	46,60	-	-	Abb. 8
e	durchgehende	46,60	0,30	2,13	
f	Zwischenschicht. Dicke: 0,22 H $k_H' = 0,1 k_H$	46,60	0,86	1,57	
4 a	anisotrop	24,30	-	-	Abb. 9
b	$k_H = 5 k_V$	24,30	0,30	3,20	
c	und durchgehende Zwischenschicht Dicke: 0,22 H $k_H' = 0,1 k_H$	24,30	0,86	1,91	
5 a	isotrop, aber im	24,30	-	-	Abb. 10
b	Zentralbereich	24,30	0,30	2,35	
c	dichtere Linse. Dicke: 0,22 H Ausdehnung: 2 H $k_H' = 0,11 k_H$	24,30	0,86	2,02	
6 a	anisotrop, aber im	24,30	-	-	Abb.11
b	Zentralbereich	24,30	0,30	2,94	
c	dichtere Linse. Dicke: 0,22 H Ausdehnung: 2 H $k_H' = 0,11 k_H$	24,30	0,86	2,23	

Bei der Komplexität der Strömungsvorgänge im Umkreis eines GZB vor allem bei Überlagerung mit einer Grundwasserströmung können die Darstellungen des Längsschnittes durch den Brunnen im Zustrombereich nur einen Vergleichsüberblick über die verschiedenen Varianten vermitteln. Zur weiteren Veranschaulichung ist die Verdeutlichung einiger räumlicher Charakteristiken an maßgebenden Fällen sinnvoll.

Zunächst erfolgt auf Abbildung 12 eine Gesamtdarstellung der oberstromigen und unterstromigen Strömung im zentralen Längsschnitt durch den Brunnen für die Fälle 2 a), b), c), d.h. für den homogenen, anisotropen Standardfall mit einem Brunnendurchsatz von  $24,35 \text{ m}^3/\text{h}$  ohne Grundwasserströmung, mit schwächerem Grundwasserstrom ( $v_f = 0,3 \text{ m/d}$ ) und mit stärkerem Grundwasserstrom ( $v_f = 0,86 \text{ m/d}$ ). Man kann in dieser Abbildung sehr gut die Strömungscharakteristiken und den Zu- und Abfluß vom Brunnen unter Einfluß der Grundwasserströmung erkennen. Deutlich wird vor allem die mit stärkerem Grundwasserstrom (bei gleichbleibendem Brunnendurchsatz) zunehmende Beaufschlagung des unteren Filterbereiches durch den Zufluß von Oberstrom. Gleichzeitig wird erkennbar, daß sich das wieder austretende Wasser im Abstrom sehr rasch auf die gesamte Grundwasserleitermächtigkeit ausbreitet, wobei natürlich ein verstärkter Abstrom im oberflächennäheren Bereich stattfindet.

Da die Darstellung der Strömung im vertikalen Längsschnitt nur die Grenzverhältnisse in diesem Bereich wiedergeben kann, ist auch eine Betrachtung der horizontalen Ausdehnung der Strömungsvorgänge notwendig. Hierzu soll beispielhaft die Strömungsverteilung in der Sohlenschicht dienen, in der die maximal vom GZB erfaßte Zustrombreite des Grundwasserzustromes festgestellt werden kann. Auf Abbildung 13 ist die Strömung in der Sohlenschicht für den Grundfall 1 b) mit homogenem, isotropem Grundwasserleiter bei einem Brunnendurchsatz von  $24,35 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem stärkeren Grundwasserzustrom mit  $v_f = 0,86 \text{ m/d}$  dargestellt. In diesem Fall wird von der modellmäßig erfaßten Gesamtbreite des Grundwasserabflusses von  $B = 6,30 \text{ H}$  bei den gegebenen Bedingungen nur eine Zustrombreite von rd. 40 % in der Sohlenschicht erfaßt. Allerdings nimmt im Gegensatz zum normalen Förderbrunnen die an der Sohle erfaßte Zuflußbreite  $B_B$  mit geringerer Tiefe bis auf eine Grenzbreite  $B_T$  an der oberen Grenze des Grundwasserleiters ab. Nach den Diagrammen der Abbildung 11 in /18/ für den vorliegenden Fall bei einer Sohlbreite des Zustromes von  $B_B = 2,5 \text{ H}$  ergibt sich eine obere Erfassungsbreite von  $B_T = 0,8 \text{ H}$ . Gleichzeitig liegt der erfaßte anteilige Grundwasserzustrom am Brunnendurchsatz nach diesen Diagrammen bei ca.  $Q_0 = 0,22 \text{ Q}$ .

Zur weiteren Verdeutlichung der Variabilität der Zustromverhältnisse ist in Abbildung 14 der Fall 6 c) der Strömung im anisotropen Grundwasserleiter ( $k_H = 5 k_V$ ) bei Vorliegen einer dichteren Linse begrenzter Ausdehnung bei einem Brunnendurchsatz von  $24,30 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem Grundwasserzustrom mit  $v_f = 0,86 \text{ m/d}$  wiedergegeben. Dabei wurde einerseits der vertikale Längsschnitt in Brunnenachse, andererseits aber auch die Strömungsverteilung in der Sohlenschicht dargestellt. Man erkennt, daß in diesem Sonderfall mit stark eingegrenzter Zirkulationsströmung der Grundwasserzustrom auf eine große Breite an der Sohlenschicht erfaßt werden kann. Sie ist infolge der notwendigen Begrenzungen des Modellsystems auf die Gesamtbreite  $B = 6,3 \text{ H}$  nicht mehr voll abgrenzbar. Da die Umsetzung der Sohlströmung jedoch rein geometrisch auf Grundlage der generellen radialsymmetrischen Strömung und deren Überlagerung mit einem gleichförmigen Grundwasserstrom erfolgte, kann die Strömung ohne weiteres über den Rand der Darstellung extrapoliert werden. Damit ergibt sich für die halbe erfaßte

Sohlbreite ein Betrag  $B_B/2 = 0,525 B_{ges}$  und für die Gesamtbreite  $B_B = 1,05 B_{ges}$ , das sind rd. 6,60 H. Rechnet man den über diese Breite zuströmenden Gesamtgrundwasserzufluß, so ergibt sich eine Menge von  $Q = 6,6 H \cdot H \cdot v_f = 5,7 H^2$ . Das ergibt bei zugrundegelegtem  $H = 9$  m einen Grundwasserstrom von  $Q_d = 460 \text{ m}^3/\text{d}$  bzw.  $Q_h = 19,15 \text{ m}^3/\text{h}$ . Selbstverständlich wird, wie aus den entsprechend untersuchten Fällen hervorgeht, wahrscheinlich höchstens ein Gesamtanteil von rd. 50 % dieses Zustromes wegen der Abnahme der Erfassungsbreite nach oben durch den GZB aufgenommen. Trotzdem zeigt es sich, daß bei dieser Konstellation der Untergrundbedingungen ein relativ hoher Wirkungsgrad des GZB zustandekommt.

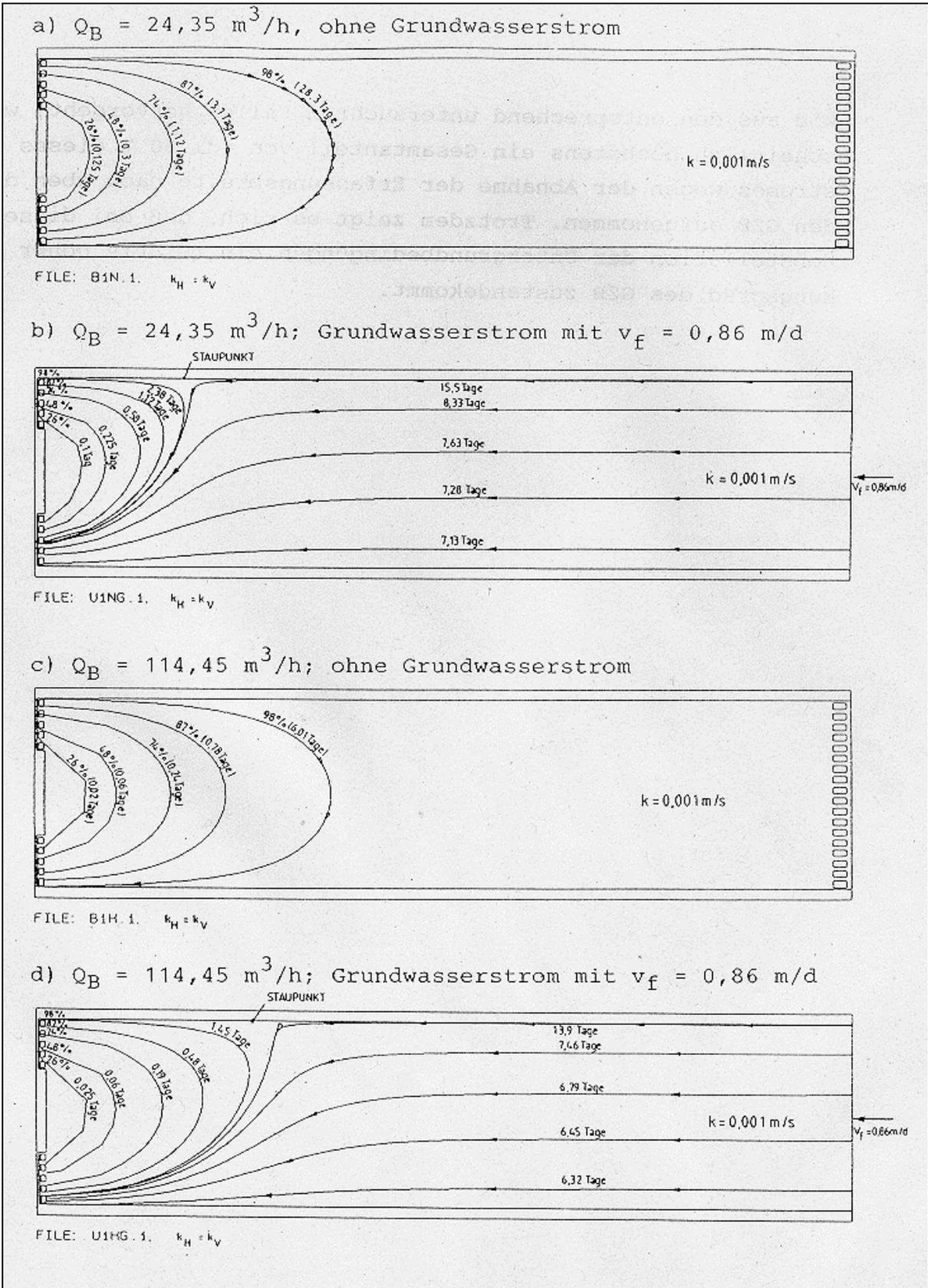


Abb.4: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Grundfall 1: Homogener und isotroper Grundwasserleiter

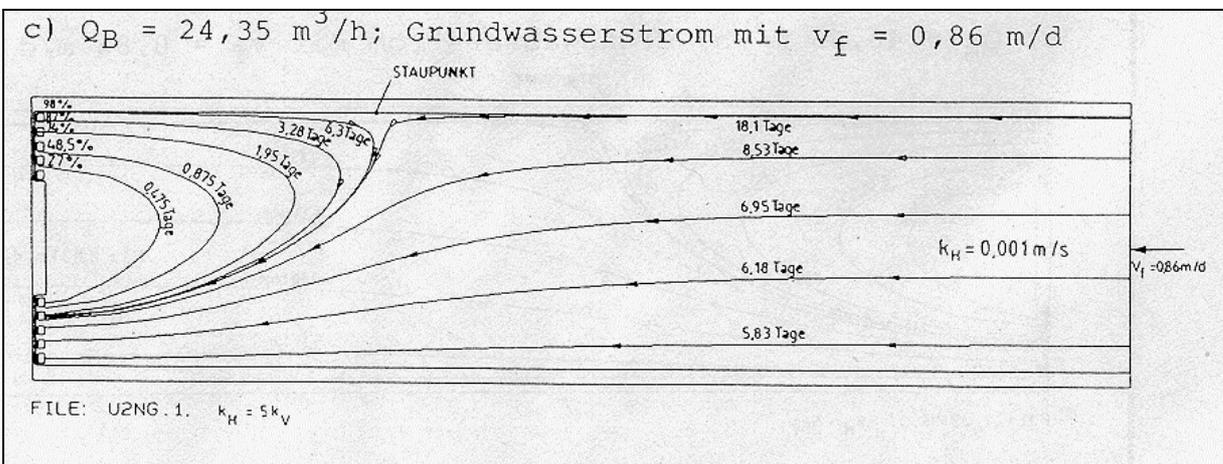
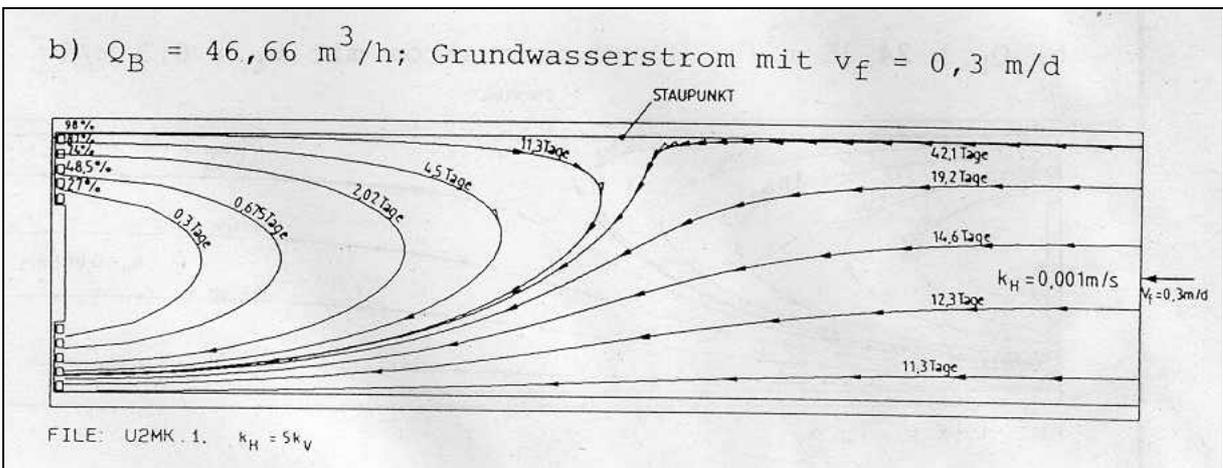
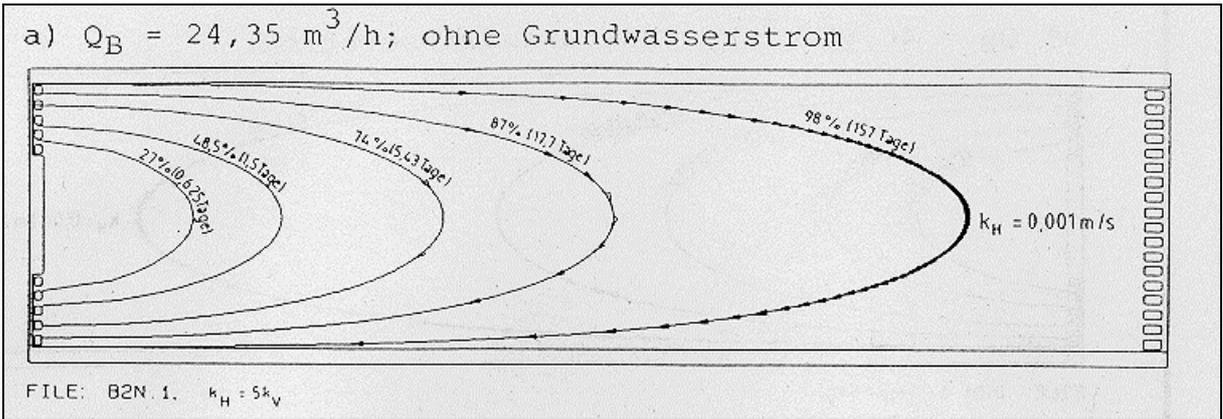


Abb.5: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 2: Anisotroper Grundwasserleiter:  $k_H = 5 k_V$

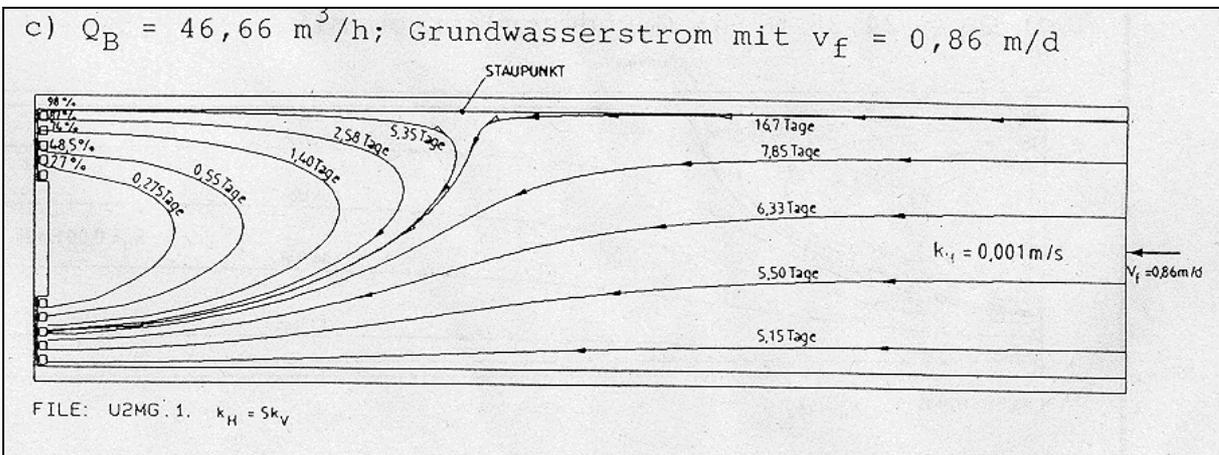
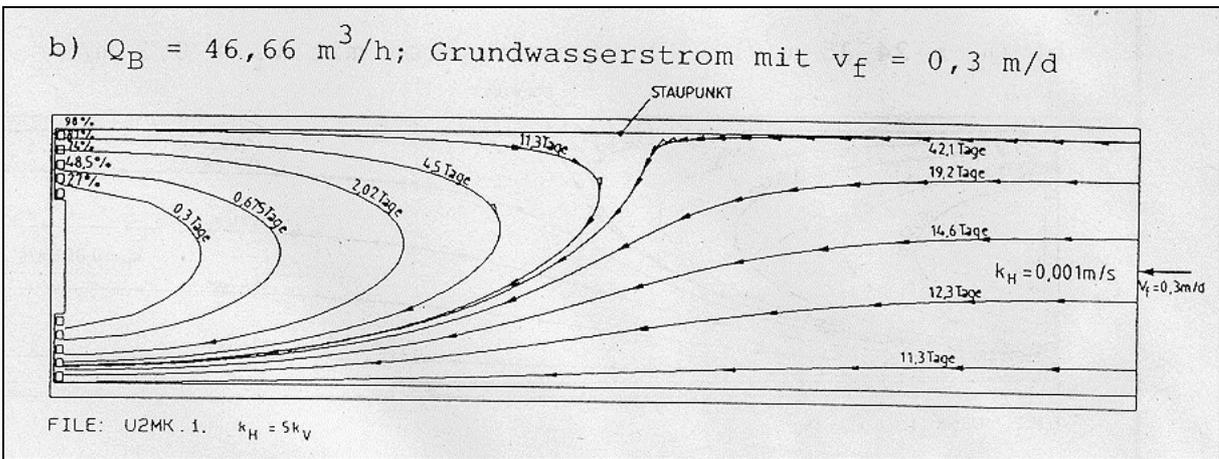
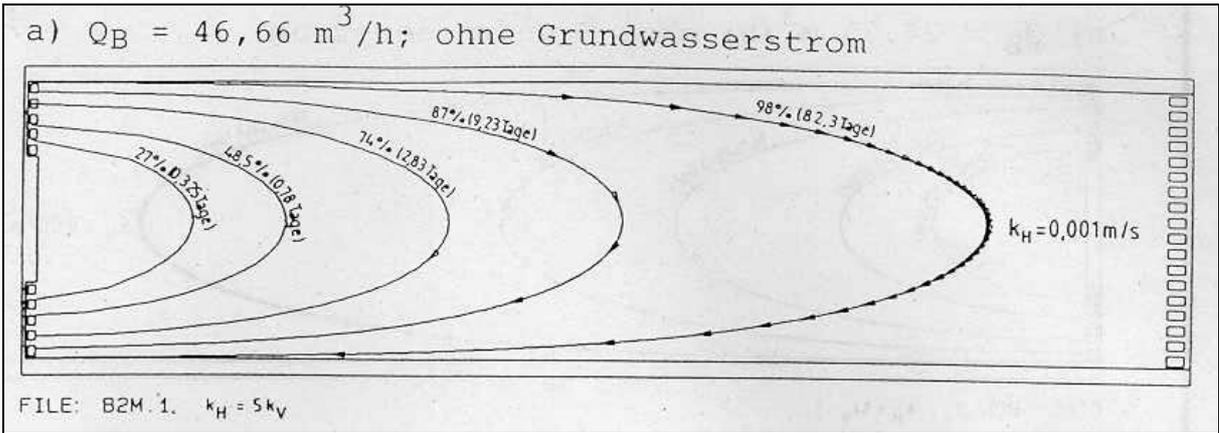


Abb. 6: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 2: Anisotroper Grundwasserleiter:  $k_H = 5 k_V$

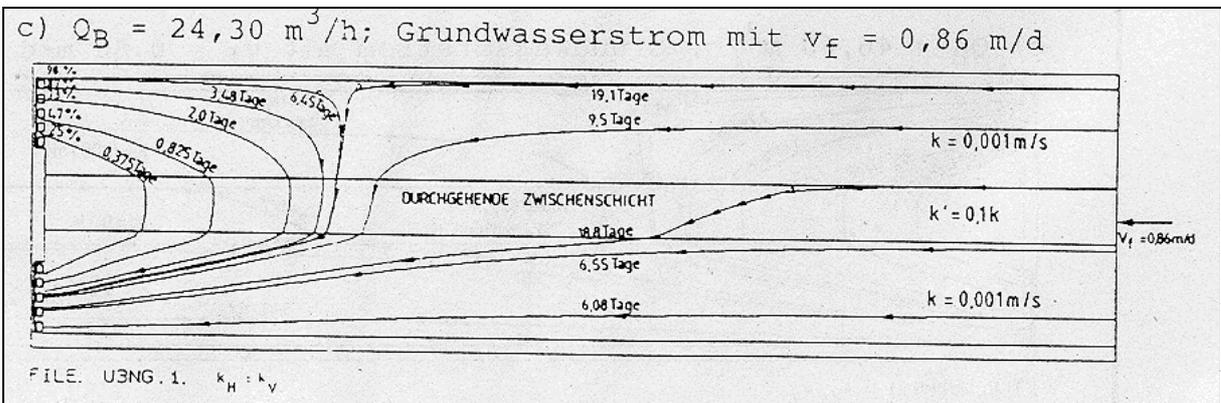
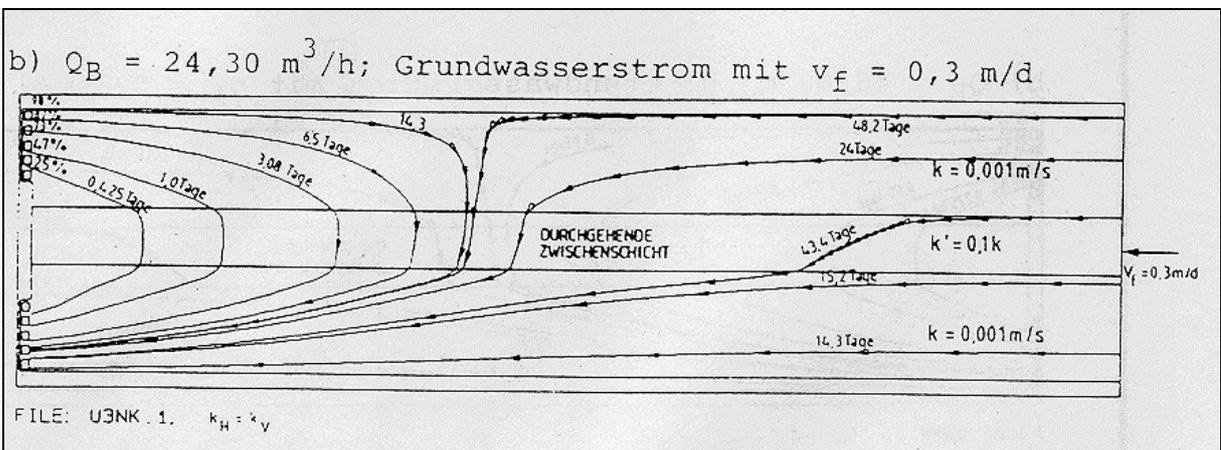
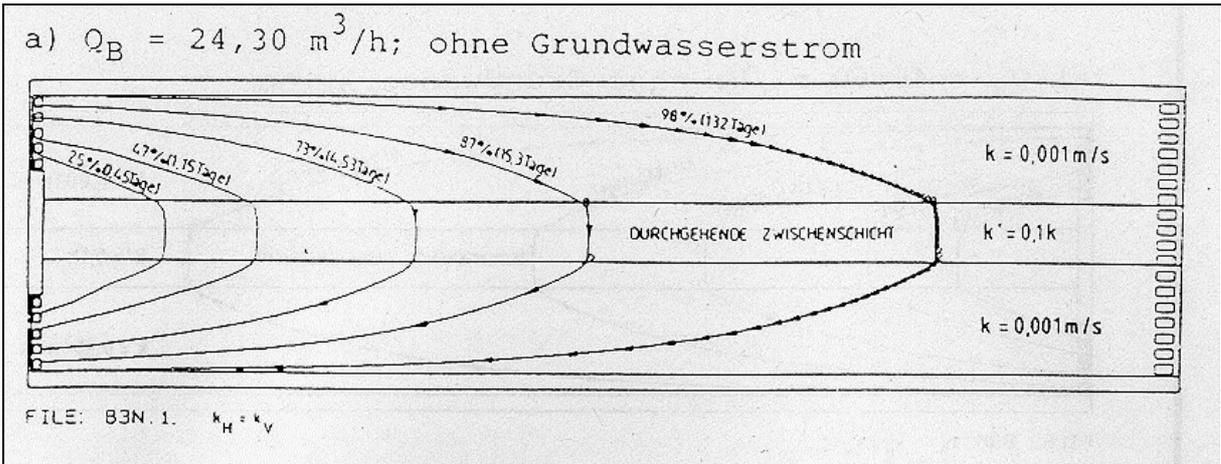


Abb. 7: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 3: Durchgehende dichtere Zwischenschicht im Grundwasserleiter. Dicke: 0,22 H; insgesamt isotrope Verhältnisse

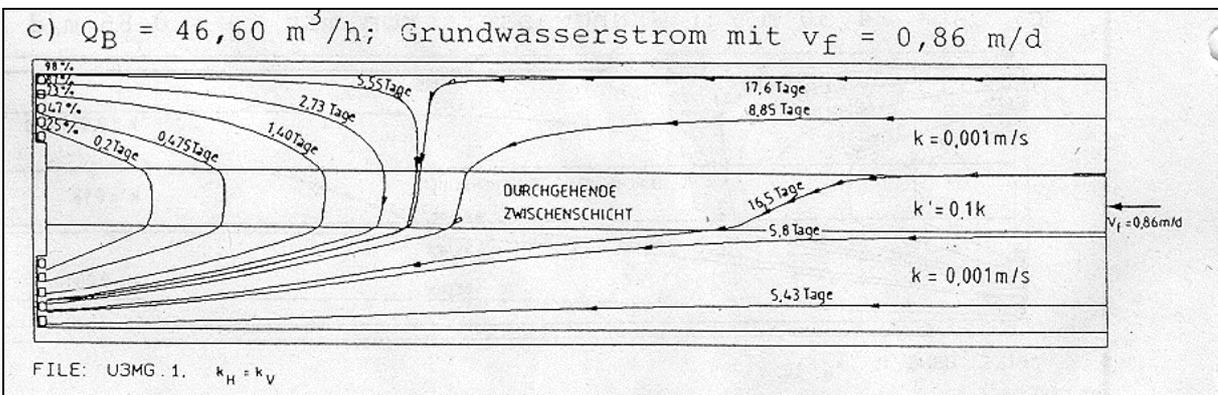
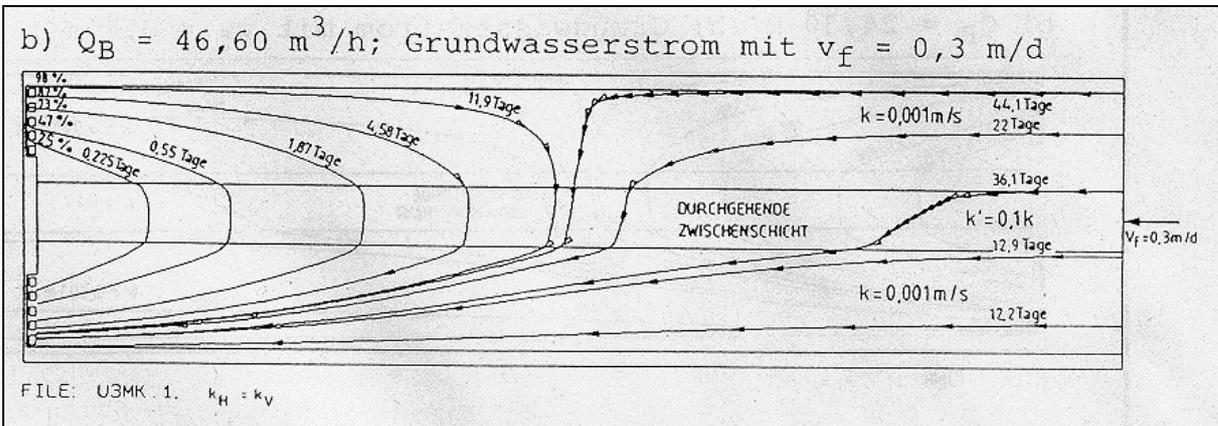
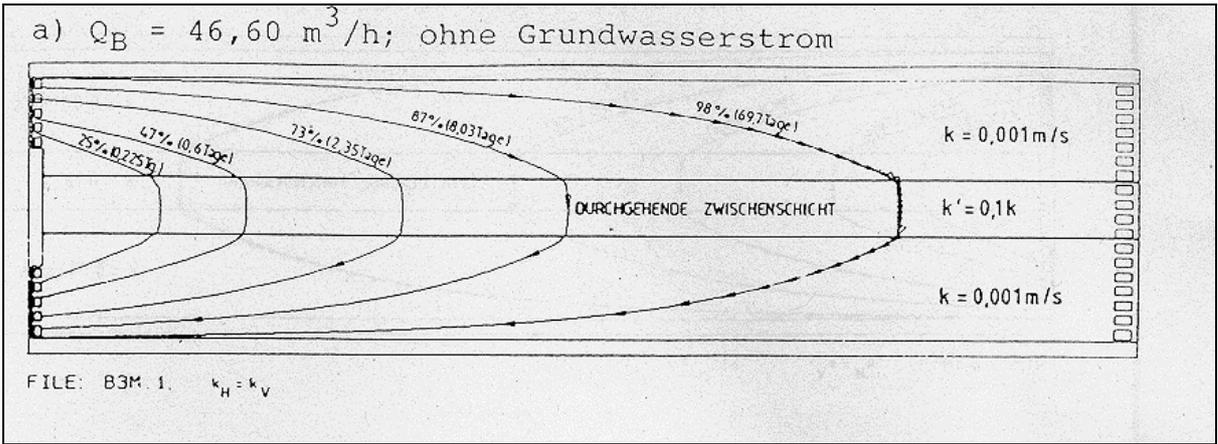


Abb. 8: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 3: Durchgehende dichtere Zwischenschicht im Grundwasserleiter. Dicke: 0,22 H; insgesamt isotrope Verhältnisse

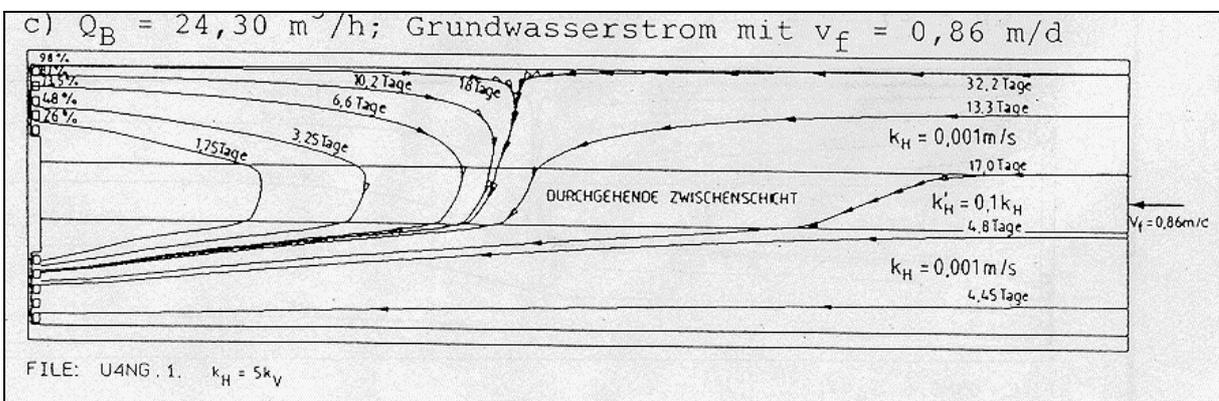
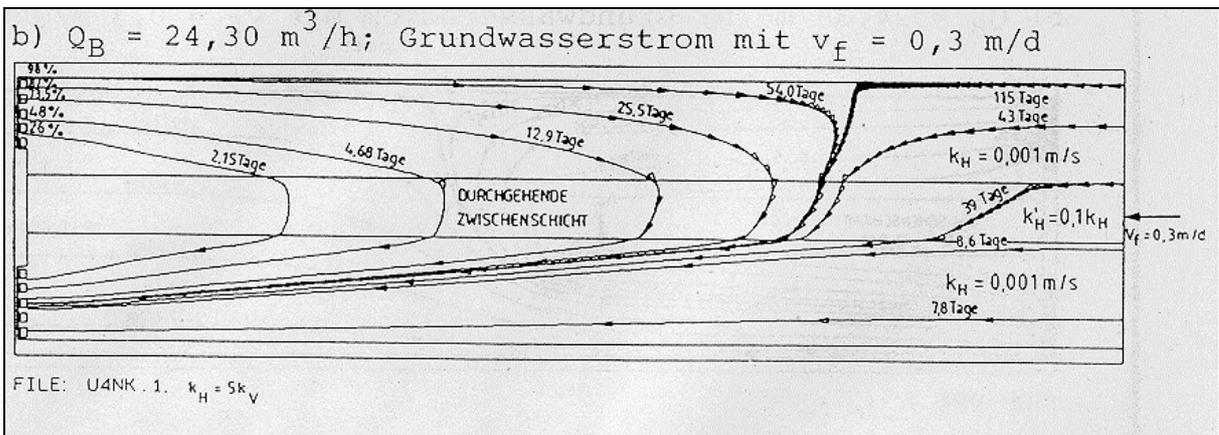
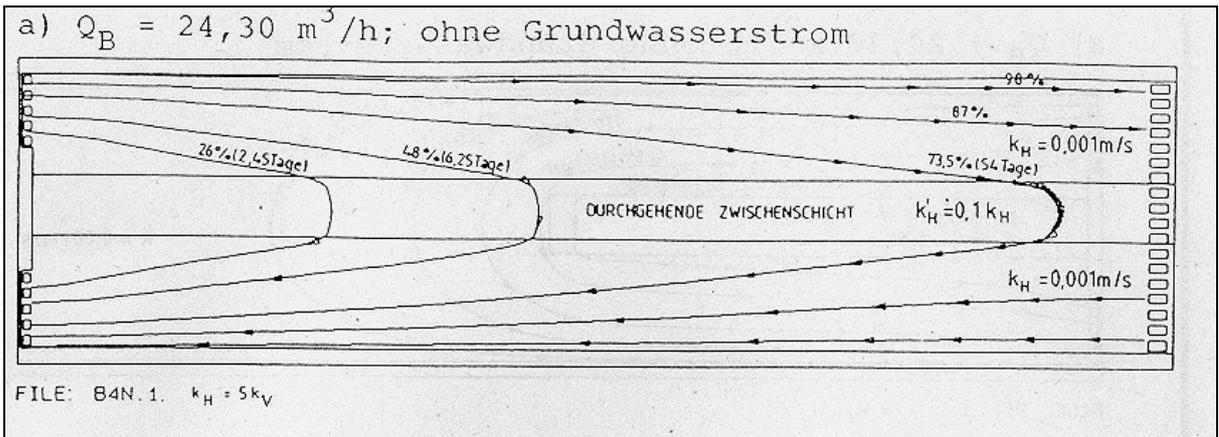


Abb. 9: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 4: Durchgehende dichtere Zwischenschicht im Grundwasserleiter. Dicke: 0,22 H; zusätzlich Gesamtanisotropie:  $k_H = 5 k_V$

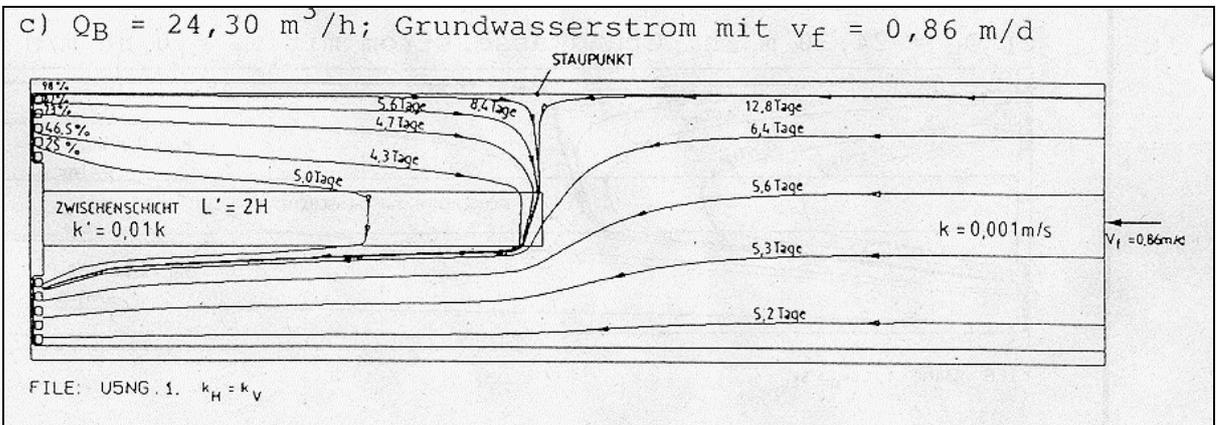
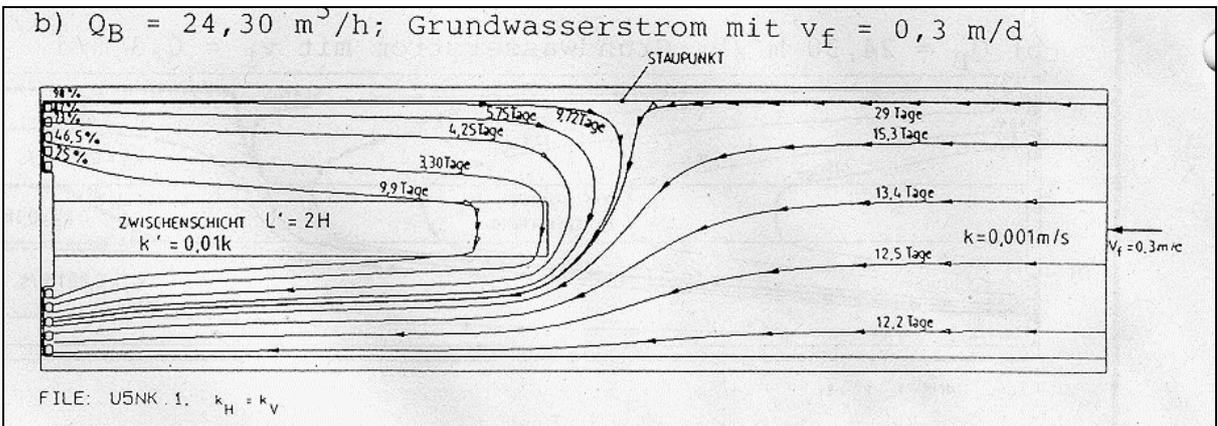
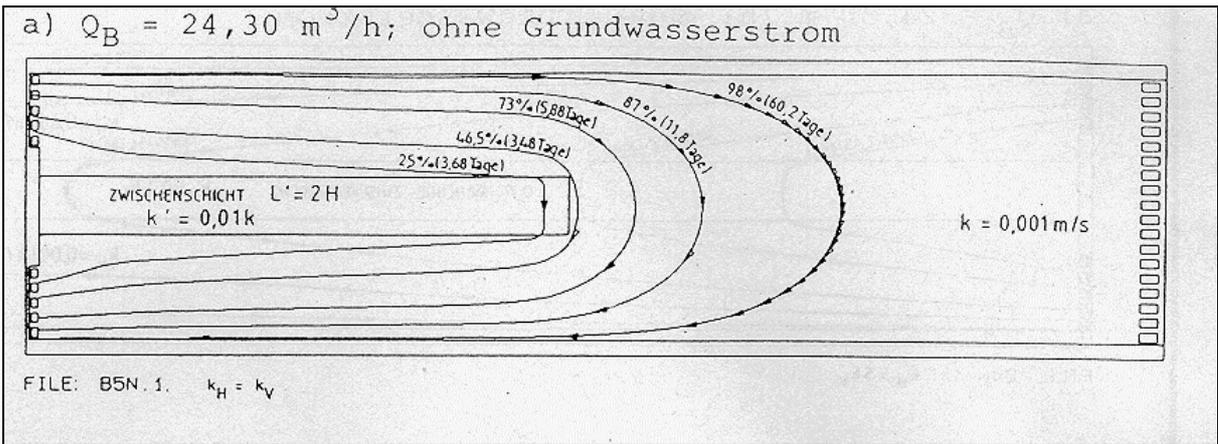


Abb. 10: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 5: Dichtere Linse im Umkreis des Brunnens. Dicke: 0,22 H; insgesamt isotrope Verhältnisse

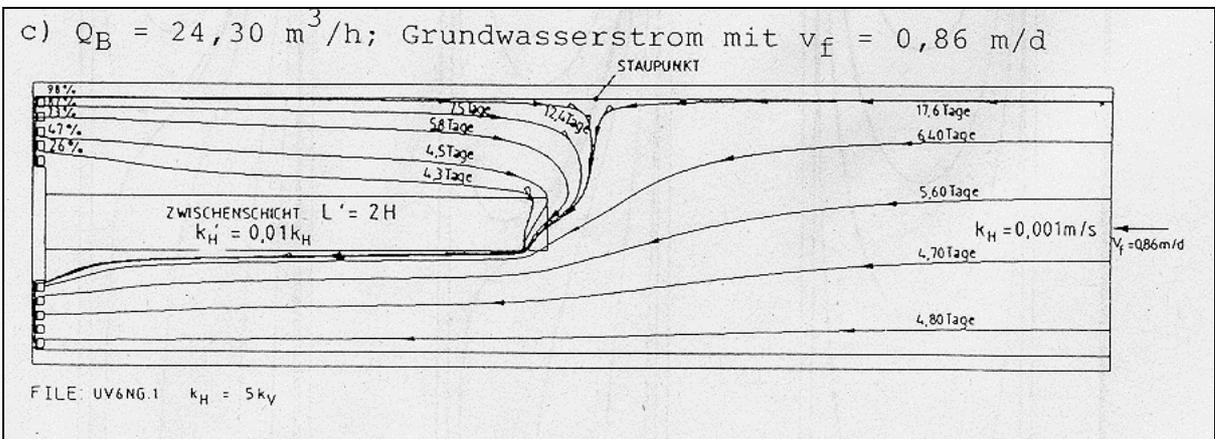
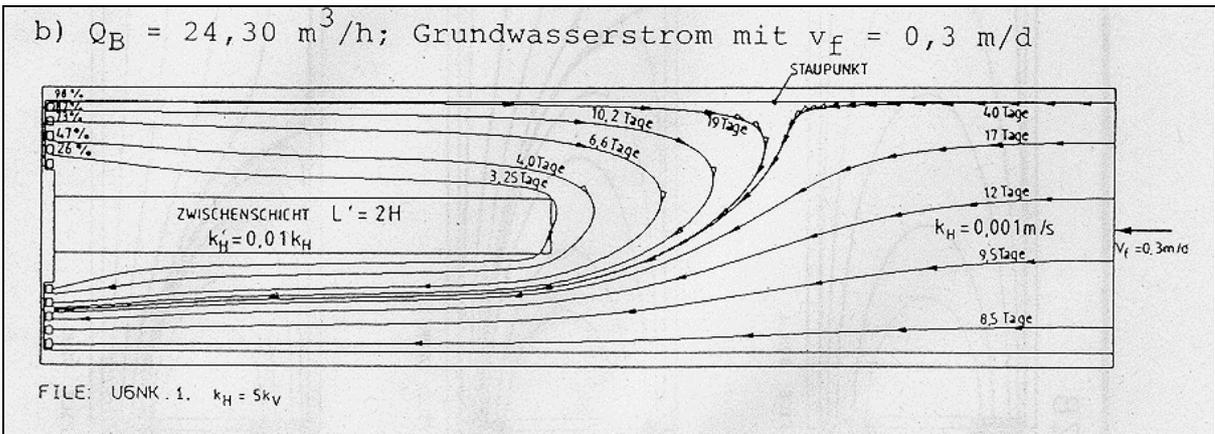
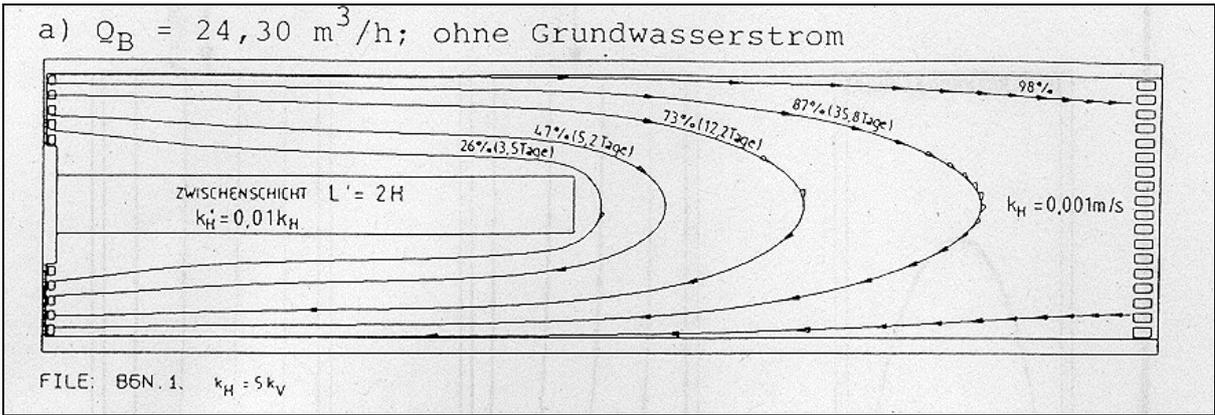


Abb. 11: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 6: Dichtere Linse im Umkreis des Brunnens. Dicke:  $0,22 H$ ; zusätzlich Gesamtanisotropie:  $k_H = 5 k_V$

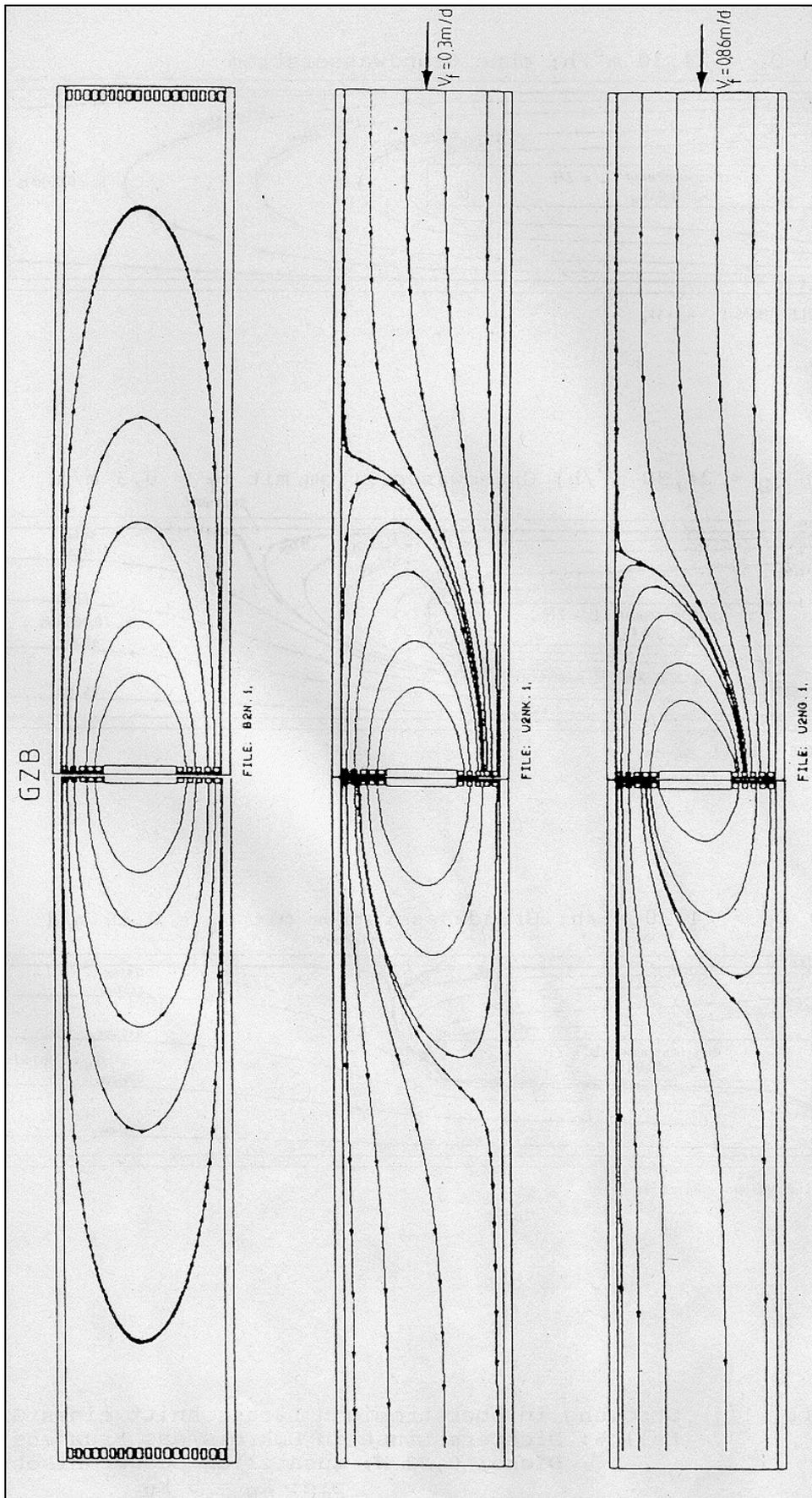


Abb.12: Zu- und Abstrom im Längsschnitt eines GZB: Anisotroper Grundwasserleiter:  $k_H = 5$   
 $k_V$ ; Brunnendurchsatz:  $Q_B = 24,35 \text{ m}^3/\text{h}$

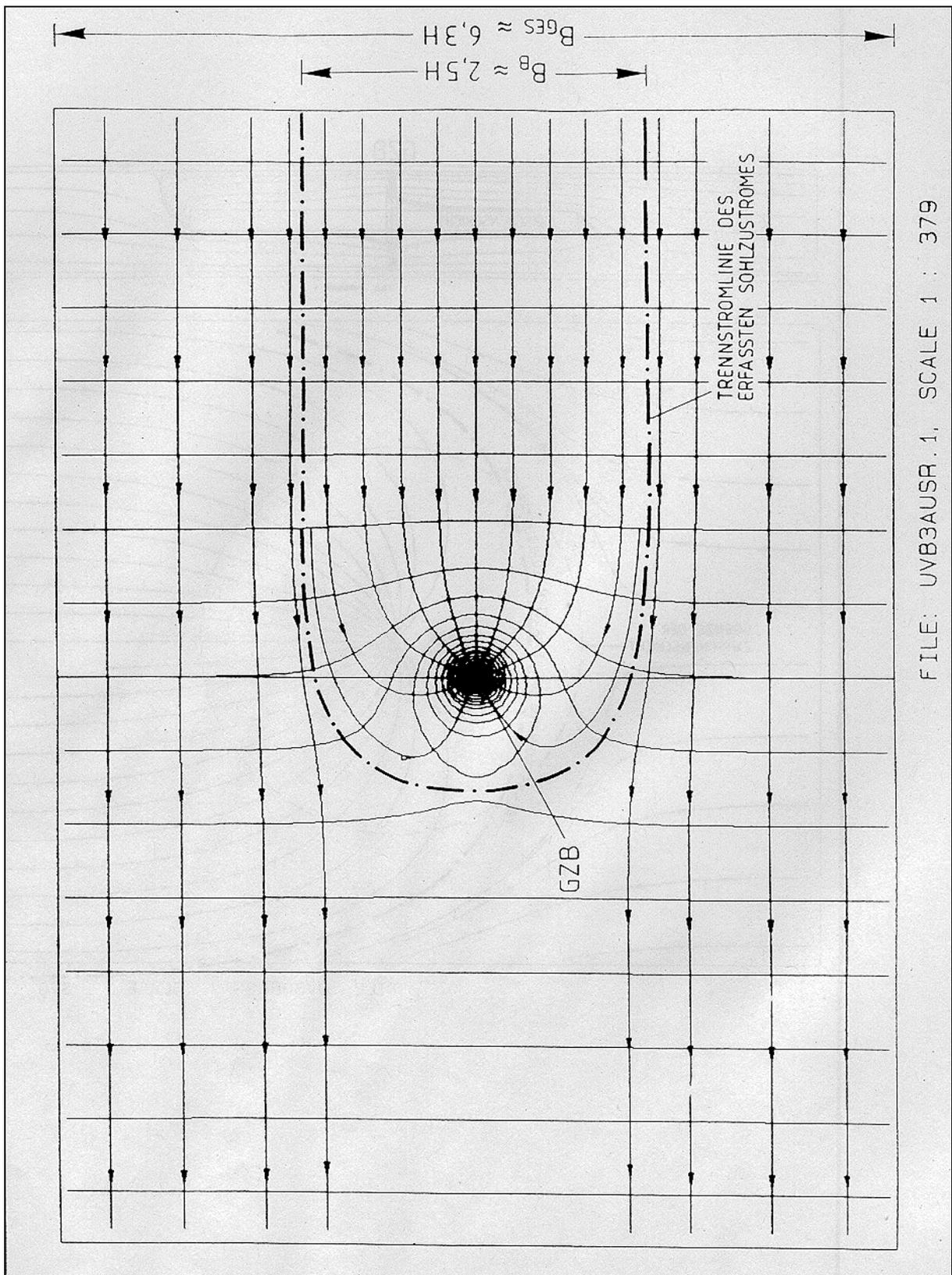


Abb. 13: Zustromverteilung zu einem GZB auf der Sohle des Grundwasserleiters. Isotroper Grundfall 1:  $Q_B = 24,35 \text{ m}^3/\text{h}$ ; Grundwasserzustrom:  $U = 0,86 \text{ m/d}$

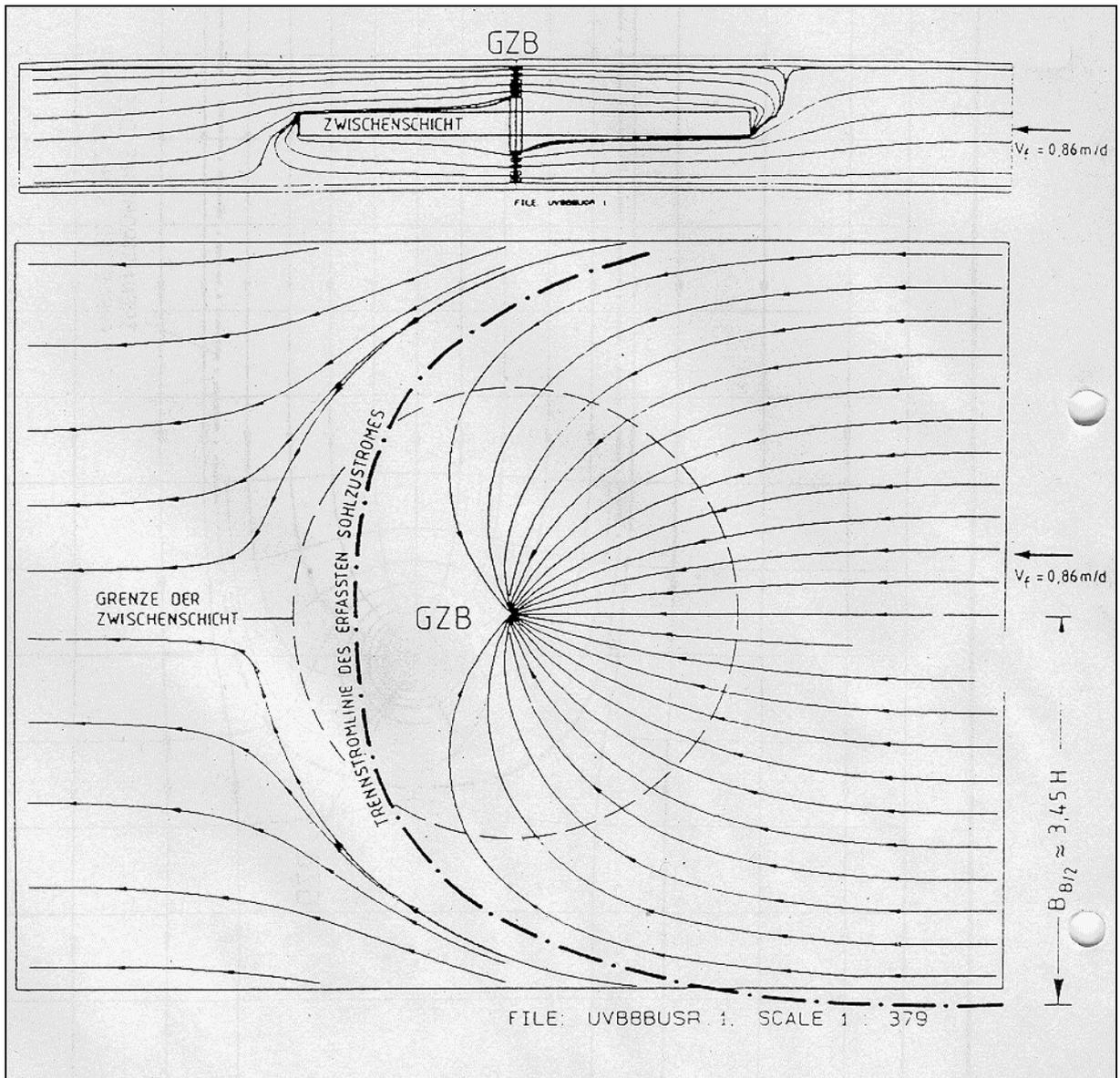


Abb. 14: GZB-Zuströmung im Fall einer zentralen dichteren Linse

### Anlage 3: Zusammenstellung von Mindestinformationen zur Erkundung des Untergrundes für eine Grundwassersanierung (aus /8/)

Mindestinformation	weitergehende Information	zusätzliche Information
Ein bis zwei Bohraufschlüsse in genügender Differenzierung bis in Tiefen, bei denen keine Kontaminationen mehr zu erwarten sind.	Mehrere Bohrungen im weiteren Umkreis, geologische Schnitte.	Differenzierte Bohraufschlüsse (z.B. Schlauchkernbohrungen) bis in größere Tiefen. Detaillierte Bohransprachen mit Festlegung unterschiedlich durchlässiger Einzelschichten. Pumpversuchsergebnisse, geophysikalische Messungen.

Informationen zum hydrogeologischen Untergrundaufbau

Mindestinformation	weitergehende Information	zusätzliche Information
<p>Gebietscharakteristische Grundwasserneubildungsrate oder bestimmende klimatische Hauptbedingungen (mittl. Niederschlagshöhe, Verdunstungshöhe, Schwankungen der Größen über mehrere Jahre). Oberflächenbeschaffenheit und -nutzung.</p>	<p>Deckschichtverteilung, Luftbilder, Bestandspläne der Landnutzung, Flurabstandskarten, Gewässerlängsschnitte, Vernäsungszonen und Überschwemmungsgebiete.</p> <p>Grundwasserhaushaltsdaten (z. B. Gebiets- und Regionalplanungen, aus Voruntersuchungen zur Grundwassernutzung).</p>	<p>Detaillierte Deckschichtkartierung, Sondierbohrungen. Detailnutzungspläne mit Standortinformationen. Differenzierte Flurabstandsmessungen (auch kürzerzeitige Veränderungen) in Zusammenhang mit entsprechenden Klimadaten.</p> <p>Geogene Grundwasserinhaltsstoffe zur Abgrenzung von Einflußbereichen und Strömungsrichtungen.</p>
<p>Maßgebende hydrologische Gebietsabgrenzungen, Abschätzung des Gesamtbetrages der Randzu- und -abströme.</p>	<p>Bereichsweise Grundwasserneubildungsraten bzw. Niederschlagshöhen. Genauere Gebietsabgrenzungen. Bereichsweise aufgeschlüsselte Randzu- und -abströme.</p>	<p>Differenzierte Randbedingungen mit Zu- und Abströmung.</p>
<p>Vorhandene Gewässer (Lage, Tiefe, Wasserstand und Wasserführung, Ausbau). Maßgebende hydrologische Gebietsabgrenzungen, gesamte Randzu- und -abströme.</p>	<p>Weitergehende Angaben zu Gewässern (Profile, Sohlenausbildung).</p>	<p>Abschnittsweise Angaben zum Wasseraustausch zwischen Grundwasser und Gewässern und über deren Sohlenbeschaffenheit (z. B. Abdichtung).</p>
<p>Angaben zu Lage und längerfristigem Betrieb (mittl. Jahreswerte) von Grundwasserentnahmen.</p>	<p>Differenziertere Daten zu Grundwasserentnahmen (z. B. Monatswerte von Einzelbrunnen).</p>	<p>Detaillierte Angaben zu Grundwasserentnahmen (Ganglinien) auch für Einzelbrunnen einer Gesamtanlage.</p>

#### Informationen zu Grundwasserhaushalt und Gebietseinflüssen

Mindestinformation	weitergehende Information	zusätzliche Information
Mindestens drei Grundwassermeßstellen im Untersuchungsbereich mit Kenntnis über Lage, Ausbauart, Tiefe sowie Wasserstandsdaten von diesen Meßstellen von möglichst mehreren Zeitpunkten.	Mehrere Grundwassermeßstellen mit Ausbauangaben und tiefendifferenzierte Wasserstandsdaten von mehreren Zeitpunkten. Grundwasserstandsganglinien an verschiedenen Meßstellen.	Verdichtetes Netz von Grundwassermeßstellen mit allen zugehörigen Angaben und längerzeitig regelmäßig erfaßten Daten (detaillierte Ganglinien mit Kurzzeitschwankungen).
Generelle Informationen über flächenhafte Verteilung des Grundwasserspiegels im weiteren Umkreis.	Grundwassergleichenkarten des weiträumigen Bereiches für verschiedene Zeitpunkte und maßgebende Stockwerke.	Unterscheidung wasserführender Tiefenbereiche und Einzelschichten.
Hauptfließrichtungen des Grundwassers, Wasserspiegelgefälle, Durchlässigkeiten.	Abgrenzung von Grundwasserströmungen, Fließwege, Fließzeiten. Tiefendifferenzierte Durchlässigkeitswerte.	Entsprechende Grundwassergleichen und -strömungskarten mit differenzierten Fließwegen und Fließzeiten. Mengenanteilige Grundwasserströmungsverteilung nach Fläche und Tiefe (z. B. Flowmeter-Messungen, Tracer-Messungen)
	Großräumige Grundwassermodelle bzw. deren Ergebnisse.	Detaillierte Grundwassermodelle des Bereiches.

#### Informationen zu den grundwasserhydraulischen Zustandsgrößen

Mindestinformation	weitergehende Information	zusätzliche Information
Dichte	Viskosität	Molekulargewicht
Wasserlöslichkeit	Restsättigung	Dissoziation
	Schmelz-/Siedepunkt	Komplexbildung
	Polarität	Gasdichte
	Teilchengröße	Adsorptions- und Desorptionsbedingungen
	Oberflächenspannung	Adsorptionsverhalten
	Spezifische Oberfläche des Korngerüsts	

#### Daten zu den physikalischen Kenngrößen

Mindestinformation	weitergehende Information	zusätzliche Information
Übersicht zum petrochemischen Aufbau des Grundwasserleiters	Detailliertere Angaben zum bereichsweisen petrochemischen Aufbau	Gleichgewichtsbedingungen, Verteilung des Kohlenstoffs im Sediment
Feststellung des Milieus im Boden, Sicker- und Grundwasser (Redoxpotential, pH-Wert, Sauerstoffgehalt).	Austauschkapazität	organ. Kohlenstoff im Sicker- und Grundwasser S- und N-Verbindungen im Sicker- und Grundwasser.

#### Daten zu den chemischen Vorgängen

Mindestinformation	weitergehende Information	zusätzliche Information
Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Redoxpotential	Art der Mikroben im Boden und Grundwasser (Elek- tronenakzeptorbe- dingungen.	Bakterienkonzentrationen pro Gramm Boden, pro Liter Grundwasser, Mikrobielles Ab- baupotential be- stimmter toxi- scher Substan- zen.

Daten zu den biologischen Vorgängen

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Prinzipielle Darstellung des Unterdruck-Verdampfer-Brunnens der Firma IEG, Reutlingen .....	4
Abb. 2.2: Überdrucksanierungsbrunnen der Firma SANTEC, Berlin.....	6
Abb. 2.3: Hydro-Airlift-Brunnen der Firma ZÜBLIN (hier als Tiefenreinigungs-Brunnen ausgebaut) .....	7
Abb. 2.4: Stromlinien dargestellt in vertikalen Längsschnitten mit natürlichen Grundwasserfließgeschwindigkeiten (DARCY) von (a) 0,0 m/d, (b) 0,3 m/d und (c) 1,0 m/d .....	8
Abb. 2.5: Ganglinien des Sauerstoffgehaltes im Grundwasser eines UVB in Berlin .....	9
Abb. 2.6: Konzentrationsveränderungen in der Grundwassermeßstelle T-P11 .....	11
Abb. 3.1: Ausbau und geologisches Profil des UVB in Mannheim-Käfertal (Fall L4 in Anlage 1) .....	19
Abb. 3.2: Gemessene Standrohrspiegelhöhen am UVB-Standort Mannheim-Käfertal (Fall L4 in Anlage 1).....	20
Abb. 3.3: Grundwasserstände beim UVB in Untersulmetingen (Fall L7 in Anlage 1).....	22
Abb. 4.1: Abgrenzung des Zustrombereiches zu einem GZB im natürlichen Grundwasserstrom mit und ohne Anisotropie der Untergrunddurchlässigkeit.....	28
Abb. 5.1: Trennstromflächen der verschiedenen Wasserkörper in der Außenströmung eines GZB: Einzugsbereich, zirkulierender und nach unterstrom abfließender Wasserkörper .....	33
Abb. 5.2: Meßnetz-Vorschlag zur Überwachung und Kontrolle der Sanierung eines Grundwasserschadensfalles.....	35
Abb. 5.3: Ausführung eines Meßnetzes für einen praktischen Fall .....	37
Abb. 5.4: Möglicher Ausbau und Ausstattung mit Meßgeräten eines UVB's.....	39
Abb. 1: Aufbau des vertikalen Modellsystems.....	60
Abb. 2: Abgrenzung des Zustrombereiches zu einem GZB im natürlichen Grundwasserstrom mit und ohne Anisotropie der Untergrunddurchlässigkeit .....	63
Abb. 3: Anteil des oberstromigen Brunnenzuflusses am Gesamtdurchfluß im GZB .....	64
Abb.4: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Grundfall 1: Homogener und isotroper Grundwasserleiter.....	75
Abb.5: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 2: Anisotroper Grundwasserleiter: $k_H = 5 k_V$ .....	76
Abb. 6: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 2: Anisotroper Grundwasserleiter: $k_H = 5 k_V$ .....	77
Abb. 7: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 3: Durchgehende dichtere Zwischenschicht im Grundwasserleiter. Dicke: 0,22 H; insgesamt isotrope Verhältnisse .....	78
Abb. 8: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 3: Durchgehende dichtere Zwischenschicht im Grundwasserleiter. Dicke: 0,22 H; insgesamt isotrope Verhältnisse .....	79
Abb. 9: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 4: Durchgehende dichtere Zwischenschicht im Grundwasserleiter. Dicke: 0,22 H; zusätzlich Gesamtanisotropie: $k_H = 5 k_V$ .....	80
Abb. 10: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 5: Dichtere Linse im Umkreis des Brunnens. Dicke: 0,22 H; insgesamt isotrope Verhältnisse .....	81

Abb. 11: Strömung im oberstromigen Längsschnitt eines GZB. Fall 6: Dichtere Linse im Umkreis des Brunnens. Dicke: 0,22 H; zusätzlich Gesamtanisotropie: $k_H = 5 k_V$ .....	82
Abb. 12: Zu- und Abstrom im Längsschnitt eines GZB: Anisotroper Grundwasserleiter: $k_H = 5$ $k_V$ ; Brunnendurchsatz: $Q_B = 24,35 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	83
Abb. 13: Zustromverteilung zu einem GZB auf der Sohle des Grundwasserleiters. Isotroper Grundfall 1: $Q_B = 24,35 \text{ m}^3/\text{h}$ ; Grundwasserzustrom: $U = 0,86 \text{ m/d}$ .....	84
Abb. 14: GZB-Zuströmung im Fall einer zentralen dichteren Linse.....	85
Informationen zum hydrogeologischen Untergundaufbau .....	86
Informationen zu Grundwasserhaushalt und Gebietseinflüssen.....	87
Informationen zu den grundwasserhydraulischen Zustandsgrößen.....	88
Daten zu den physikalischen Kenngrößen.....	89
Daten zu den chemischen Vorgängen.....	89
Daten zu den biologischen Vorgängen.....	90

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der wichtigsten Daten der in Anlage 1 beigefügten Anwendungsfälle.....	15
Tafel 4.1: Zusammenstellung der Untersuchungsfälle .....	26
Tafel 1: Zusammenstellung der Untersuchungsfälle .....	72

## Indexverzeichnis

### E

Erkundungsmaßnahmen	
Grundwassersanierung .....	30

### G

Grundwassersanierung	
Erkundung des Untergrundes .....	86
Erkundungsmaßnahmen .....	30
Grundwasserüberwachungssystem .....	33
Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB)	
.....	3
Hydro-Airlift-Brunnen (HAB).....	7
hydrochemische Überwachung .....	39
Meßnetz .....	36
Meßnetz-Vorschlag .....	34
Sanierungsplanung .....	32
Überdrucksanierungsbrunnen .....	5
Unterdruck-Verdampfer-Brunnen	
(UVB) .....	3, 4
Untersuchungsmaßnahmen, begleitende	
.....	32

Grundwasserüberwachungssystem .....	33
-------------------------------------	----

Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB)	
Allgemeines .....	3
Anwendungsfälle .....	15, 48
Anwendungsgrenzen.....	40
Ausbau und Ausstattung mit	
Meßgeräten .....	38
Brunnen .....	37
Empfehlungen für den Anwender.....	30
Erkundungsmaßnahmen .....	30
Grundwasserüberwachungssystem .....	33
Hydro-Airlift-Brunnen (HAB).....	7
hydrochemische Überwachung .....	39
Meßnetz .....	36
Meßnetz-Vorschlag .....	34
Überdrucksanierungsbrunnen .....	5
Unterdruck-Verdampfer-Brunnen	
(UVB) .....	3, 4
untersuchte Fälle.....	24, 72
Untersuchungsmaßnahmen, begleitende	
.....	32
Varianten und Kombination .....	12

### H

hydraulische Sanierungsverfahren	
Erkundungsmaßnahmen .....	30
Grundwasserüberwachungssystem .....	33

Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB)	
--------------------------------------	--

.....	3
Hydro-Airlift-Brunnen (HAB) .....	7
hydrochemische Überwachung .....	39
Meßnetz.....	36
Meßnetz-Vorschlag .....	34
Sanierungsplanung .....	32
Überdrucksanierungsbrunnen .....	5
Unterdruck-Verdampfer-Brunnen	
(UVB).....	3, 4
Untersuchungsmaßnahmen, begleitende	
.....	32

Hydro-Airlift-Brunnen (HAB) .....	7
hydrochemische Überwachung .....	39

### M

Meßnetz bei Sanierung durch GZB... 34, 36	
---	--

### S

Sanierungsplanung .....	32
Sanierungsverfahren, hydraulische	
Erkundung des Untergrundes .....	86
Erkundungsmaßnahmen.....	30
Grundwasserüberwachungssystem.....	33
Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB)	
.....	3
Hydro-Airlift-Brunnen (HAB) .....	7
hydrochemische Überwachung .....	39
Meßnetz.....	36
Meßnetz-Vorschlag .....	34
Sanierungsplanung .....	32
Überdrucksanierungsbrunnen .....	5
Unterdruck-Verdampfer-Brunnen	
(UVB).....	3, 4
Untersuchungsmaßnahmen, begleitende	
.....	32

### Sanierungsverfahren, in-situ

Erkundungsmaßnahmen.....	30
Grundwasserüberwachungssystem.....	33
Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB)	
.....	3
Hydro-Airlift-Brunnen (HAB) .....	7
hydrochemische Überwachung .....	39
Meßnetz.....	36
Meßnetz-Vorschlag .....	34
Sanierungsplanung .....	32
Überdrucksanierungsbrunnen .....	5

---

Unterdruck-Verdampfer-Brunnen (UVB) .....	3, 4	Allgemeines .....	3
Untersuchungsmaßnahmen, begleitende .....	32	Anwendungsfälle .....	48
<b>Ü</b>		Ausbau und Ausstattung mit Meßgeräten.....	38
Überdrucksanierungsbrunnen .....	5	Verfahren .....	4
Unterdruck-Verdampfer-Brunnen (UVB)		Untersuchungsmaßnahmen, begleitende - Grundwassersanierung .....	32