

FACHTECHNISCHE VORAUSSETZUNGEN ZUR FESTLEGUNG VON SANIERUNGSMASSNAHMEN

H. Kobus
K. Spitz

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Am 1. November 1986 gelangten durch den Brand einer Lagerhalle der Firma Sandoz in Schweizerhalle bei Basel zwischen 10 und 30 Tonnen Flüssigchemikalien bei Rhein-km 159 in den Rhein. Phosphorsäureester, insbesondere die Insektizide Disulfoton, Thiometon, Etrimphos und Propetamphos waren die Hauptbelastung des Rheinwassers.

Die Schadstoffwelle durchlief den Rhein in der Bundesrepublik Deutschland innerhalb von knapp zwei Wochen. Das Ende der Schadstoffwelle wurde auf deutscher Seite bei Rhein-km 865 (Kleve/Bimmen) am 11.11.1986 um 10 Uhr gemessen.

Die Warnung der Wasserversorgungsunternehmen entlang des Rheins über den "Internationalen Warn- und Alarmdienst Rhein" erfolgte rechtzeitig genug, um vor dem Durchgang der Schadstoffwelle alle technisch möglichen Maßnahmen zielgerecht einleiten zu können. Die Wasserentnahme aus ufernahen Brunnen zur Trinkwasserversorgung und zur Grundwasseranreicherung wurden abgestellt oder zumindest gedrosselt. Während des Durchlaufs der Welle wurden Wasserproben entnommen und umgehend analysiert.

Ist ein ähnliches Szenario auch im Falle einer Grundwasserverschmutzung denkbar? Sind die Probleme vergleichbar?

Ein wesentlicher Unterschied der Schadstoffausbreitung im Grundwasser ist die **Ausbreitungsgeschwindigkeit**. Rechnet man in Fließgewässern in Kilometern pro Tag, so rechnet man im Grundwasser mit Metern pro Tag oder mit Metern pro Jahr. Ein Vorteil der geringen Transportgeschwindigkeiten liegt darin, daß Schadstoffe in der Regel erst nach Jahren bzw. Jahrzehnten ein großes Grundwasservolumen belasten. Oft steht ausreichend Zeit zur Verfügung, notwendige, effektive Sanierungsmaßnahmen zu planen (Unfälle ausgenommen). Der Nach-

teil geringer Fließzeiten im Grundwasser ist allerdings, daß sie genauso für die hydraulische Sanierung gelten. Schadstoffe, die sich über Jahre im Grundwasser ausgebreitet haben, können umgekehrt, wenn überhaupt, oft nur über Jahrzehnte aus dem Grundwasserleiter entfernt werden.

Ein weiterer Unterschied ist die **Ausbreitungsrichtung**. Sie ist in einem Fließgewässer auch für den Laien unmittelbar erkennbar. Die Ausbreitungsrichtung im Untergrund ist hingegen auch für den Fachmann zunächst unbekannt. Sie kann unter Umständen trotz aufwendiger Felduntersuchungen ein Schätzwert bleiben. Die Ausbreitungsrichtung ändert sich durch wechselnde hydrologische Bedingungen, in Nähe von Oberflächengewässern kann sie sich sogar umkehren.

Schließlich unterscheidet sich die **Erkundung** der Grundwasserstände und der Grundwasserbeschaffenheit zu den entsprechenden Messungen in einem Oberflächengewässer. Grundwasser ist nicht direkt zugänglich (Quellen und Brunnen ausgenommen). Messungen der Grundwasserströmung und -qualität müssen indirekt (z.B. geophysikalische Verfahren) oder direkt über Bohrungen bzw. Sondierungen erfolgen. Diese sind zeit- und kostenintensiv, zudem ist die Beprobung sensibel gegenüber Störeinflüssen.

Neben den eben genannten Unterschieden stellt sich im Falle einer Grundwasserkontamination oft die Frage nach dem **Verursacher**. Grundwasserkontaminationen werden in der Regel "zufällig" entdeckt und der Schadstoffeintrag kann schon viele Jahre zurückliegen. Die Belastung des Grundwassers mit Schadstoffen ist nicht nur ein Vergehen unserer Generation, sondern ihr Ursprung liegt oft schon mehrere Jahrzehnte zurück. Sie stieg mit der industriellen Entwicklung in Europa in diesem Jahrhundert rapide an. Je älter eine Kontamination ist, desto schwieriger wird es im allgemeinen, den Schadstoffherd zu lokalisieren und seine Größe abzuschätzen.

Die Charakteristiken einer Schadstoffausbreitung im Grundwasser spiegeln sich auch in der Planung von Sanierungsmaßnahmen wieder. Der vorliegende Beitrag befaßt sich mit den dafür notwendigen fachtechnischen Voraussetzungen: der Erkundung, dem Abschätzen der Sanierungsbedürftigkeit, der Planung geeigneter Sanierungsmaßnahmen und dem Erstellen eines Meßprogramms.

2 ERKUNDUNG

2.1 Historische Erkundung

Die Erkundung läßt sich in eine historische und eine technische Erkundungsstufe aufteilen. Die hohen Kosten, die gewöhnlich mit einer Grundwassersanierung verbunden sind, machen es notwendig, alle vorhandenen Daten und Informationen zusammenzutragen, die dazu beitragen, kostspielige Untersuchungen auf ein Minimum zu begrenzen.

Die historische Erkundung beginnt mit der **Bestandsaufnahme** der vorhandenen Unterlagen und der Geländedaten. Eine Vielzahl von Unterlagen der Fachbehörden und Kommunen sind von Nutzen wie beispielweise Gutachten zur Hydrogeologie, Unterlagen über vorhandene Grundwassererschließungen, Unterlagen über ehemalige und momentane Landnutzung und Luftbildaufnahmen. Ergänzt wird die historische Erkundung durch Untersuchungen vor Ort (Befragungen, Geländebegehung, Aufnahme von Oberflächengewässern, Aufsuchen aller zugänglichen Grundwassermeßstellen usw.).

Die **Auswertung** erstreckt sich auf alle vorhanden relevanten Unterlagen.

Illustrative Beispiele für den Einsatz von Luftbildern bei der Standortuntersuchung und deren Auswertung werden z.B. in Redfield, 1987 aufgeführt. Die zeitliche Entwicklung einer unkontrollierten Geländeauffüllung mit Sonderabfall in Richmond, Virginia, das Auffüllvolumen und vermutliche Schadstoffherde konnten mit Hilfe von Luftbildern abgeschätzt werden. Die Luftbilder gaben zusätzlich Hinweise auf zwischenzeitlich verschüttete Fässer mit Flüssigabfällen. Diese Informationen erlauben es in der Praxis, den Umfang aufwendiger Felduntersuchungen zu begrenzen. Weitere Beispiele der Verwendung von Luftbildern bei der Ermittlung von Altlasten sind z.B. in einem Leitfaden des Ministers für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, 1987 zusammengestellt.

2.2 Technische Erkundung

Die technische folgt der historischen Erkundung. Die Kosten einer sorgfältig ausgeführten technischen Erkundung sind gering im Vergleich zu den Mehrko-

sten, die eine auf eine dünne Datendecke aufbauende Sanierung verursachen kann. Das Ziel der technischen Untersuchung ist die Beschaffung notwendiger Informationen, um eine gesicherte Gefährdungsabschätzung und, falls notwendig, die Planung einer effektiven Sanierung durchführen zu können.

Eine ausführliche Zusammenstellung und Wertung der vielfältigen Untersuchungsmethoden kann nicht gegeben werden, zumal laufend neue Verfahren entwickelt bzw. bestehende Verfahren weiterentwickelt werden. Die meisten Verfahren lassen sich jedoch folgenden Gruppen zuordnen:

- o **geophysikalische Untersuchungen**, die ähnlich der Luftbildinterpretation unterstützende Untersuchungen sind (z.B. Messung des Widerstands).
- o **geologisch-hydrogeologische Untersuchungen zur Grundwasserströmung**, die den Grundwasserleiter erschließen und Auskunft über den Aquiferaufbau und die Grundwasserströmungsverhältnisse vermitteln.
- o **Erkundungen der Grundwasserbeschaffenheit**, die Auskunft über die räumliche Schadstoffverteilung geben (z.B. "multi-level sampler"). Aufgrund der Konzentrationsschwankungen ist die tiefenspezifische Beprobung wichtig.
- o **chemische und physikalische Untersuchungen**, die zur Feststellung und Quantifizierung von Verunreinigungen dienen (z.B. Bodenluft-Messungen).
- o **Untersuchungen zur Biologie**, die integral die Umweltbeeinflussung durch den Schadstoff erfaßt (z.B. Untersuchung des betroffenen Ökosystems).

Die Probleme der Grundwassererkundung sind vielfältig. Sie entstehen bei der Positionierung und dem Ausbau der Grundwassermeßstelle, bei der Wahl der Materialien, bei der Probennahme und -konservierung usw.

Ist eine repräsentative Beprobung tiefenspezifischer Konzentrationen mittels Grundwassermeßstellen überhaupt möglich?

Die Meßstelle allein ist eine Störung per se. Durch das Einbringen eines Lochs in den Untergrund werden der Aquiferaufbau und die Wasserverhältnisse in der unmittelbaren Umgebung verändert. Mutterboden, Bohrschlamm, Hydrauliköl vom Bohrgerät kann ungewollt in das Bohrloch gelangen. Mit der Installation der Meßstelle wird dem Grundwasserleiter eine Wunde zugefügt, die erst nach Wochen und Monaten verheilt.

Die direkte Grundwasserbeprobung und die damit verbundenen hydraulischen Probleme sind seit mehreren Jahren Gegenstand von Forschungsarbeiten am Institut für Wasserbau an der Universität Stuttgart. Die Fragen des Meßstellenbaus und der geeigneten Probennahmetechnik zur Gewinnung zuverlässiger Grundwassermeßdaten sind in einer Reihe von Veröffentlichungen der Fachwelt zugänglich [Barczewski, B.; Marschall, P.], [Teutsch et al.]. **Bild 1** und **Bild 2** illustrieren besondere Beprobungstechniken, um in älteren, meist vollkommen verfilterten Meßstellen zuverlässige, tiefenspezifische Messungen durchführen zu können. Neu installierte Meßstellen können, wenn auch aufwendig, so konzipiert werden, daß tiefenspezifische Konzentrationsmessungen möglich werden.

3 ABSCHÄTZUNG DER SANIERUNGSBEDÜRFTIGKEIT

3.1 Laissez Faire - Abschätzung

Sanieren ist mit hohen Kosten verbunden. Die Kosten der Sanierung der Rocky Mountain Arsenal Site in Colorado belaufen sich zum Beispiel auf 2,5 Milliarden US\$. Diese hohen Kosten sind nicht länder- oder ortsspezifisch. Die Stadt Stuttgart hat beispielweise in den vergangenen Jahren 55 Millionen DM ausgegeben, um 33 Tonnen chlorierte Kohlenwasserstoffe aus dem Grundwasser zurückzugewinnen. 1,5 Millionen DM Sanierungskosten pro Tonne stehen einem Beschaffungswert von einigen Tausend DM gegenüber.

Diese Zahlen machen deutlich, daß nicht jede bekannte Grundwasserbelastung saniert werden kann. Aufbauend auf den Ergebnissen der Erkundung muß deshalb jeder Grundwasserschadensfall einer Gefährdungsabschätzung unterzogen werden. Ein einfaches Kochrezept zur Beantwortung der Frage nach der Sanierungsbedürftigkeit existiert nicht. Behörden und Verwaltung haben die vorrangige Bedeutung derartiger Entscheidungshilfen früh erkannt. Ihre umfangreichen Arbeiten finden in anerkannten Regelwerken wie z.B. "Altlasten Handbuch Baden-Württemberg" etc. ihren Niederschlag.

Was wird passieren, wenn nicht saniert wird? Die "Laissez-Faire" Abschätzung ist das Grundelement der Gefährdungsabschätzung. Informationen über die Mengen und Eigenschaften der Schadstoffe, über die Lage des Schadstoffherdes und über alle Kontaminationspfade (wie Grundwasser, Luft, Boden,

Oberflächengewässer, Pflanze etc.) sind notwendig. Dazu kommen Informationen über Art und Umfang der momentanen und zukünftigen Exposition von Schutzgütern, Pflanzen, Tier und Mensch in Verbindung mit der Kontamination.

Die Vielfalt geologischer Verhältnisse und die Vielzahl von Schadstoffen mit ihren spezifischen Ausbreitungsverhalten illustrieren die **Bilder 3** und **4**. Eine Vielzahl unterschiedlicher Ausbreitungsarten von Schadstoffen im Grundwasserleiter ist denkbar. Grundwasserbelastungen durch lokale Schadstoffeinträge aus industriellen Kontaminationen sollen deshalb nachfolgend nur am Beispiel chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW) illustriert werden, die in einen Grundwasserleiter aus Lockergestein eindringen (**Bild 5**).

Chlorierte Kohlenwasserstoffe sind deutlich schwerer als Wasser. Im Schadensfall dringen sie durch die oberen Bodenschichten in den Grundwasserleiter ein und sickern aufgrund ihrer Schwerkraft in tiefere Grundwasserbereiche. Ein Teil der CKW bleibt in durchsickertem Porenraum hängen. Trotz geringer Wasserlöslichkeit wird der Schadstoff allmählich in gelöster Form ausgewaschen und kann von der Grundwasserströmung großräumig mittransportiert werden. Chlorierte Kohlenwasserstoffe in Phase bleiben auf die unmittelbare Umgebung des Schadensherdes beschränkt, sie können allerdings durch den Einfluß der Schwerkraft in tiefe Aquiferbereiche vordringen.

Da CKW's bei der Bodenpassage nur extrem langsam abgebaut werden, muß bei jedem Schadensfall im Einzugsgebiet eines Wasserwerks früher oder später damit gerechnet werden, daß die in den Grundwasserleiter gelangten CKW's das Wasserwerk erreichen. Schutzzonenüberlegungen, die auf Laufzeiten oder Abbauzeiten beruhen, sind für nicht abbaubare Substanzen bedeutungslos.

Bild 6 illustriert ein Ausbreitungsszenario an einem Naturbeispiel. Die aktuelle Ausbreitung ist ortsspezifisch. Eine sorgfältige Erkundung ist daher immer unumgänglich, die nicht nur auf den Schadensherd konzentriert ist, sondern auch die Beschaffung von Informationen einschließt, die für die Prognose erforderlich werden.

3.2 Grenzwerte und Sanierungsziele

Grenzwerte zur Beurteilung einer Grundwasserkontamination und zur Festlegung von Sanierungszielen unterscheiden sich grundlegend von Grenzwerten, wie sie ansonsten aus der Technik bekannt sind. Die Bemessung einer Brücke

erfolgt nach genau festgelegten Grenzwerten für die zulässige Druck- oder Zugspannung des verwendeten Baumaterials. Derartige allgemein anerkannte Zahlenwerte, die die Sanierungspriorität und das Sanierungsziel im Fall einer Grundwasserkontamination festlegen, existieren noch nicht und sind in der Praxis schwer festzulegen.

Grenzwerte und Sanierungsziele sind bei der Abschätzung der Sanierungsbedürftigkeit von besonderer Bedeutung. Auf sie wird in diesem Band an anderer Stelle ausführlich eingegangen.

4 PLANUNG GEEIGNETER SANIERUNGSMASSNAHMEN

4.1 Sanierungsvarianten

Die Grundwassersanierung konzentriert sich zunächst analog der Bodensanierung im Falle einer Altlast auf den Schadensherd. Naturgemäß ist jede Sanierungsmaßnahme umso wirkungsvoller, je früher und je näher sie am Schadstoffherd eingesetzt wird. Eine Grundwasserverschmutzung breitet sich über den eigentlichen Schadensherd hinaus aus. Durch die Grundwasserströmung findet eine Ortsverlagerung von Schadstoffen statt. Durch Diffusion und Dispersion dringen Schadstoffe auch in wenig durchströmte Bereiche des Grundwasserleiters ein. Diese Dynamik einer Grundwasserkontamination muß die Grundwassersanierung berücksichtigen [Kobus,H.].

Methodisch lassen sich zwei Hauptansätze der Sanierung unterscheiden. Während der erste Ansatz auf die Sanierung durch Abpump- und Spülmaßnahmen aufbaut, zielt der zweite Ansatz auf die In-situ-Reinigung des Untergrunds durch einen mikrobiologischen Abbau oder einer chemischen Immobilisierung der Schadstoffe. In beiden Sanierungsansätzen ist die Grundwasserhydraulik ein kontrollierendes Element.

Abpumpmaßnahmen dienen dem Ziel, das kontaminierte Grundwasser aus dem Aquifer zu entfernen und ein weiteres Ausbreiten zu verhindern.

Infiltrationsmaßnahmen, über die das gereinigte Wasser dem Grundwasserleiter wieder zugeführt wird, werden oft aus Gründen der Grundwasserbilanz

gefordert. Durch entsprechende Anordnung kann eine erhöhte Spülung im Grundwasserleiter bewirkt werden.

Durch Kombination unterschiedlicher hydraulischer Sanierungselemente sind im konkreten Sanierungsfall eine Vielzahl von Varianten möglich.

Die Vorgehensweise in der Planung sei an dem zuvor vorgestellten Schadensfall einer CKW-Kontamination im Vorfeld eines Wasserwerkes illustriert. Will man eine solche Kontamination sanieren, kommen mehrere Möglichkeiten in Frage.

Die elementare Anordnung sieht Sanierungsbrunnen an der Spitze der Kontamination und am Schadensherd vor (**Bild 6**). Die Brunnen müssen bei dieser Anordnung lange betrieben werden.

Eine deutlich abweichende Sanierungsvariante entsteht, wenn die hydraulische Sanierung über eine Vielzahl von Brunnen entlang der Längsachse der Kontamination erfolgt (**Bild 6**). Die Investitionskosten sind jetzt höher, die Sanierungszeit und damit die laufenden Betriebskosten sind jedoch geringer [Herr, M.].

4.2 Bewertungsmaßstäbe

Um einzelne Sanierungsvarianten vergleichen zu können, bedarf es objektiver Bewertungsmaßstäbe. Ein Maßstab zur gegenseitigen Wertung ist der hydraulische Wirkungsgrad. Er vergleicht die aus dem Grundwasserleiter entnommene Schadstoffmenge mit dem geförderten Grundwasservolumen [Herr, M.]. Der hydraulische Wirkungsgrad ist als technischer Vergleichsmaßstab zu sehen. Andere Maßstäbe wie zum Beispiel die Wirtschaftlichkeit oder Durchführbarkeit müssen berücksichtigt werden.

Die Auslegung hydraulischer Sanierungsmaßnahmen und deren Vergleich setzen fundierte Kenntnisse über das Transportverhalten der Schadstoffe im Grundwasser voraus. Neben der Erkundung wird die Berechnung notwendig. Für einfache Konfigurationen können einfache Überschlagsrechnungen genügen. Komplizierte Strömungs- oder Transportverhältnisse verlangen den Einsatz numerischer Modelle. Das numerische Modell ist ein vielseitiges Handwerkszeug, mit welchem u.a. einzelne Sanierungsvarianten relativ schnell durchgespielt und miteinander verglichen werden können. Die Vorteile numerischer Modelle bei der Grundwassersanierung wird am besten durch die wachsende Zahl

der Modellanwendungen belegt. Dames & Moore beispielweise hat allein in den letzten 10 Jahren in über 100 Grundwasserstudien Modelle eingesetzt.

Es muß betont werden, daß auch bei der Modellanwendung die sorgfältige unterstützende Erkundung den Grundstein für Erfolg legt. Die Ergebnisse eines numerischen Modells können jeweils nur so gut oder so schlecht sein wie die dem Modell zugrundeliegenden Eingabedaten.

5 ENTWURF DES BEGLEITENDEN MESSPROGRAMMS

5.1 Anordnung der Meßstellen

Mit dem Aufstellen eines Meßprogramms stellen sich die Fragen nach dem "Wo, wie, was, wann". Die Frage nach dem wo, also nach der zweckmäßigen Anordnung von Meßstellen wird durch die historische Erkundung unterstützt. In der technischen Erkundung werden anschließend immer neue Daten gewonnen, die die weitere Planung beeinflussen. Die Positionierung von Meßstellen ist somit ein dynamischer Vorgang. Zusätzliche Hilfestellung für die zweckmäßige Positionierung von Meßstellen gibt weiterhin die Laissez-Faire Abschätzung zusammen mit dem numerischen Grundwassermodell. Schon angesichts der beträchtlichen Kosten, die mit dem Einrichten von Meßstellen verbunden sind, erscheinen in der Regel die Kosten für eine Modellierung gerechtfertigt.

5.2 Meßparameter und Meßprogramm

Was soll analysiert werden? Über 3 Millionen organische Verbindungen sind bekannt. Zur Zeit werden davon mehr als 40 000 Tausend industriell hergestellt und genützt. Jedes Jahr werden tausende neue Verbindungen entdeckt, einige finden industrielle Verwendung. Viele dieser organischen Stoffe sind potentielle Grundwasserverschmutzer.

Bei Altstandorten ist eher zu vermuten, welche Schadstoffe auftreten können. Die früher dort ansässige Industrie mit ihren "industriespezifischen Schadstoffen" ist meist bekannt. Die Hauptbelastungen des Grundwassers z. B. unterstrom einer Altablagerung, sind im Gegensatz dazu zunächst unbekannt. Als eine ge-

eignete Strategie, um den Untersuchungsumfang in einem wirtschaftlichen Rahmen zu halten, hat sich die Entwicklung von abgestuften Analysenprogrammen bewährt. Neben repräsentativen Summenparametern (z.B. Summe aller Kohlenwasserstoffe, TOC, AOX etc.) werden einzelne Leitsubstanzen ausgewählt, die, wenn möglich, mit wenig Aufwand analysiert werden können.

Der Auswahl der Leitparameter kommt große Bedeutung zu. Sie ist dabei nicht nur von der Art der Grundwasserkontamination abhängig, sondern sie reflektiert ebenso die untersuchte Fragestellung. Unter dem Gesichtspunkt der maximalen Ausdehnung einer Kontamination ist die Substanz von Bedeutung, die sich weder anlagert noch abbaut oder umwandelt (z.B. Chlorid). Wird nach der maximalen Sanierungsdauer gefragt, muß die Substanz betrachtet werden, die am Korngerüst adsorbiert und damit die Sanierungsdauer kontrolliert.

Insgesamt lassen sich für den Umfang des begleitenden Meßprogramms keine Kataloglösungen formulieren. Das Meßprogramm sollte auch die wirksame Überwachung und Erfolgskontrolle nach Abschluß der Maßnahme berücksichtigen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Sanierung eines Grundwasserleiters ist mit hohem technischen und finanziellen Aufwand verbunden. Dies und die Besonderheiten der Schadstoffausbreitung im Grundwasser verlangen die sorgfältige Planung und Durchführung von Sanierungsmaßnahmen. Folgende fachtechnische Voraussetzungen verdienen besondere Aufmerksamkeit:

- o **Die Erkundung der Kontamination.** Hauptaugenmerk der Erkundung muß dem Schadensherd dienen, sie soll sich jedoch auch auf die Erfassung von Information erstrecken, die für die Ausbreitungsprognose von Bedeutung ist.
- o **Die Abschätzung der Sanierungsbedürftigkeit.** Die Notwendigkeit, der Umfang und das Ziel jeder Sanierung ist vom Einzelfall abhängig.
- o **Die Planung geeigneter Sanierungsmaßnahmen.** In der Regel stehen unterschiedliche Sanierungsvarianten zur Diskussion. Die naturnahe numerische Modellierung ist ein wichtiges Planungshilfsmittel.

- o **Der Entwurf des begleitenden Meßprogramms.** Die Erkundung der Grundwasserbeschaffenheit ist um ein vielfaches anspruchsvoller als die Messung von Grundwasserständen. Sie ist zugleich um ein vielfaches aufwendiger und schwieriger als vergleichbare Messungen in Oberflächen-gewässern.

Die Bedeutung dieser Voraussetzungen für die Planung einer effektiven Sanierungsmaßnahme kann nicht überbetont werden. Betrachten wir den Grundwasserleiter als einen Patienten, die Kontamination als eine Krankheit. Würden Sie als Arzt ohne sorgfältige Untersuchung und Diagnose operieren?

Bilderverzeichnis

- Bild 1: Das In-Line-Packer-System [Teutsch et al.]
- Bild 2: Mehrfachpackersystem nach [Barczewski, B; Marschall, P.]
- Bild 3: Transport bei unterschiedlichen geologischen Verhältnissen [Spitz, K.]
- Bild 4: Schematisierung von Wasserinhaltsstoffen [Spitz, K.]
- Bild 5: Versickerung und Ausbreitung chlorierter Kohlenwasserstoffe im Untergrund im Nahbereich des Schadensherdes [Kobus, H.; 1988]
- Bild 6: Unterschiedliche Strategien zur hydraulischen Sanierung einer Grundwasserkontamination [Herr, M.; Kinzelbach, W.]

In-Line-Packer-System

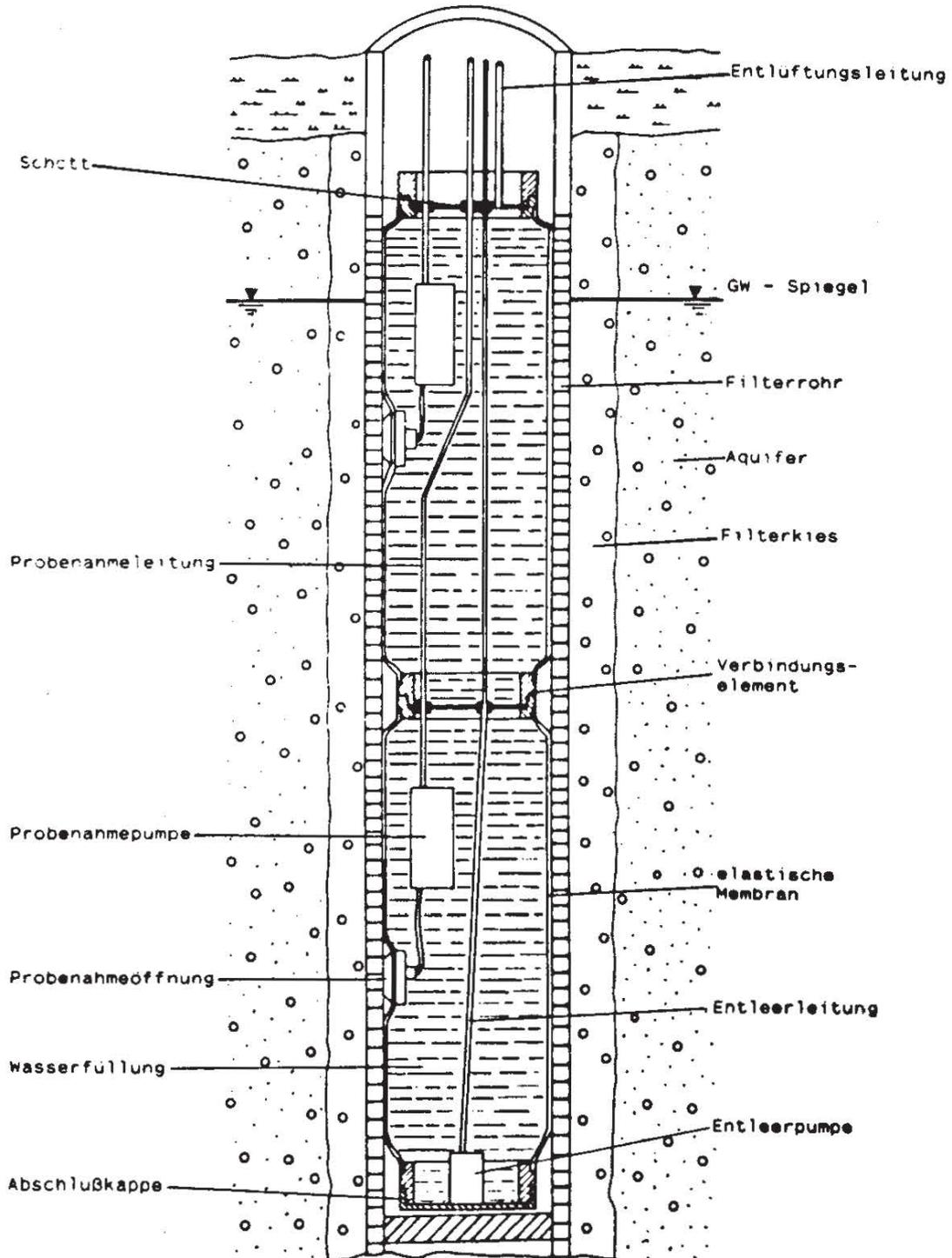


Bild 1: Das In-Line-Packer-System [Teutsch et al.]

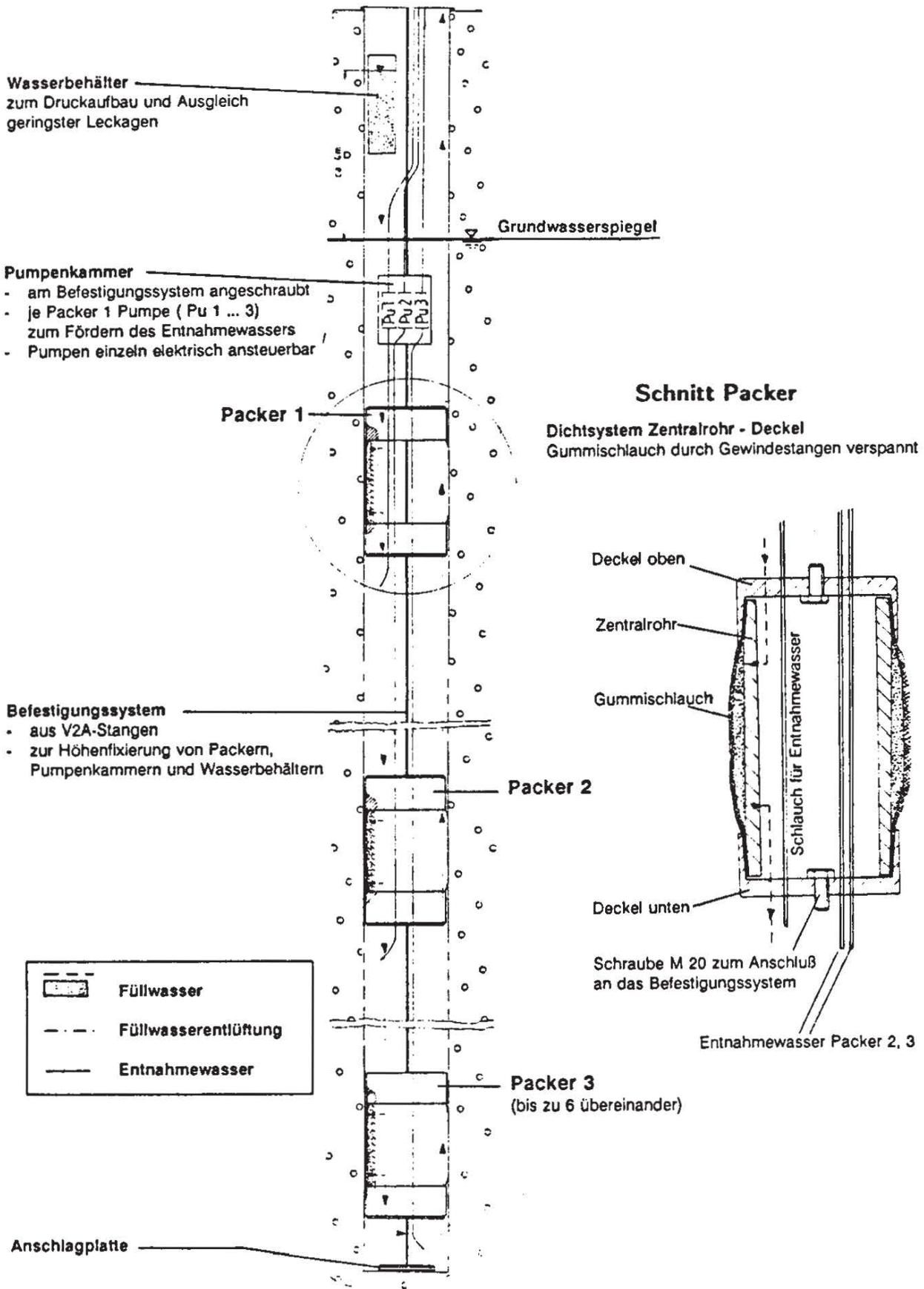
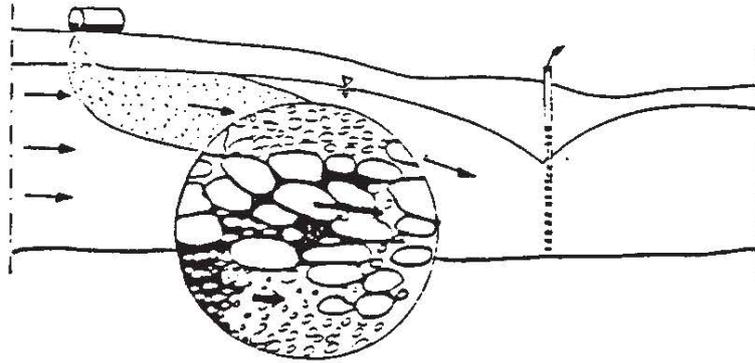
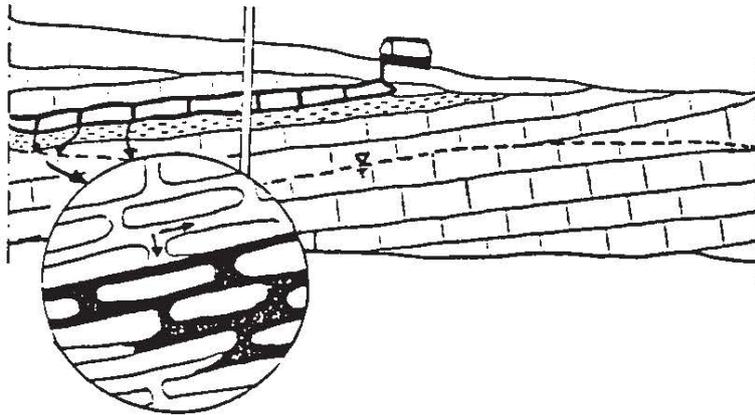


Bild 2: Mehrfachpackersystem [Barczewski, B; Marschall, P.]

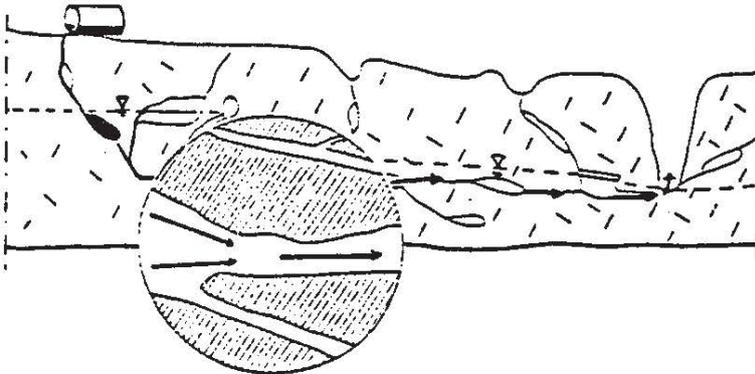
PORENGRUNDWASSERLEITER



KLUFTRUNDWASSERLEITER



KARSTGRUNDWASSERLEITER



GERING DURCHLÄSSIGES PORÖSES GRUNDWASSERSYSTEM

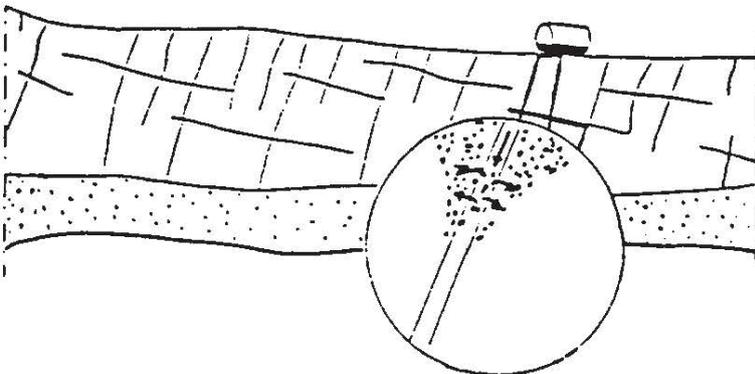
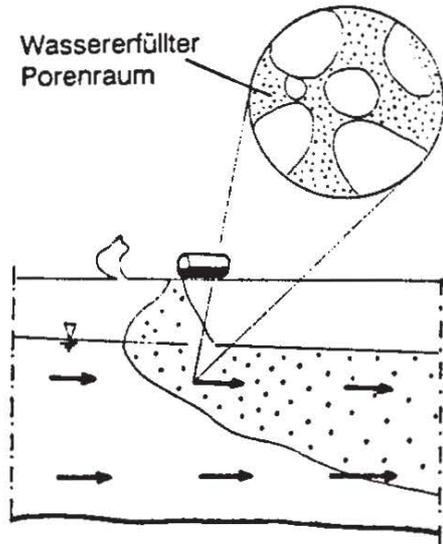
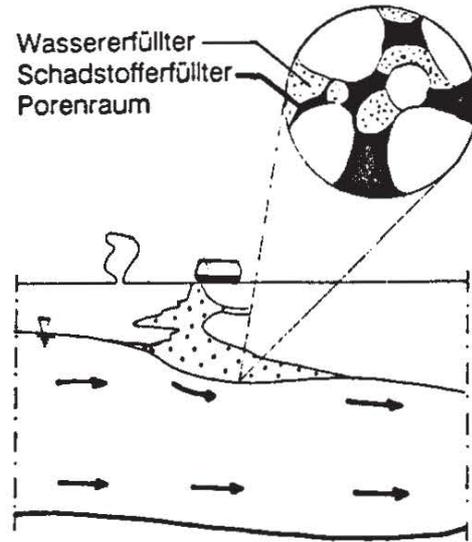


Bild 3: Transport bei unterschiedlichen geologischen Verhältnissen [Spitz, K.]

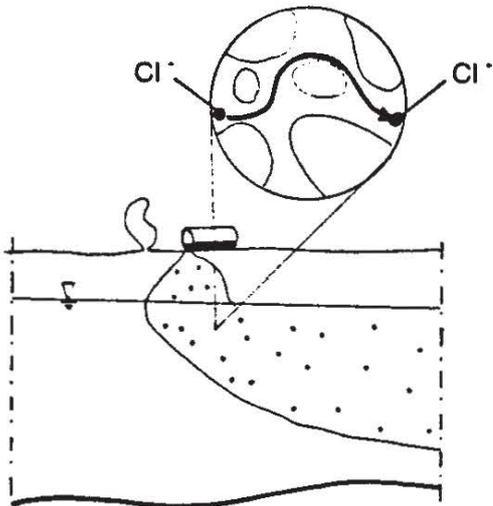
EINPHASENSTRÖMUNG (mischbar)



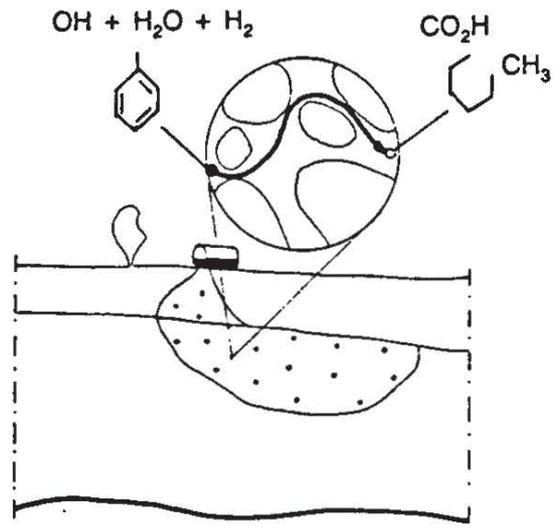
MEHRPHASENSTRÖMUNG (nicht mischbar)



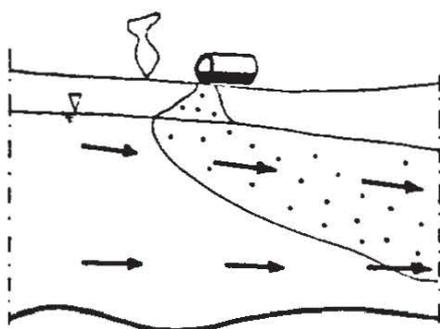
KONSERVATIV



NICHTKONSERVATIV



OHNE DICHTEUNTERSCHIED



MIT DICHTEUNTERSCHIED

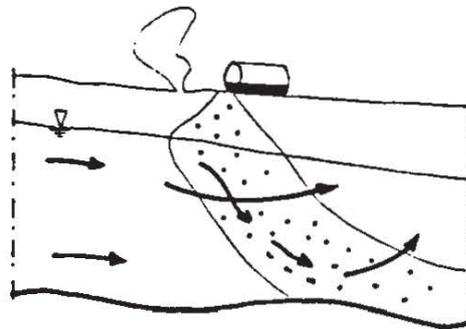


Bild 4: Schematisierung von Wasserinhaltsstoffen [Spitz, K.]

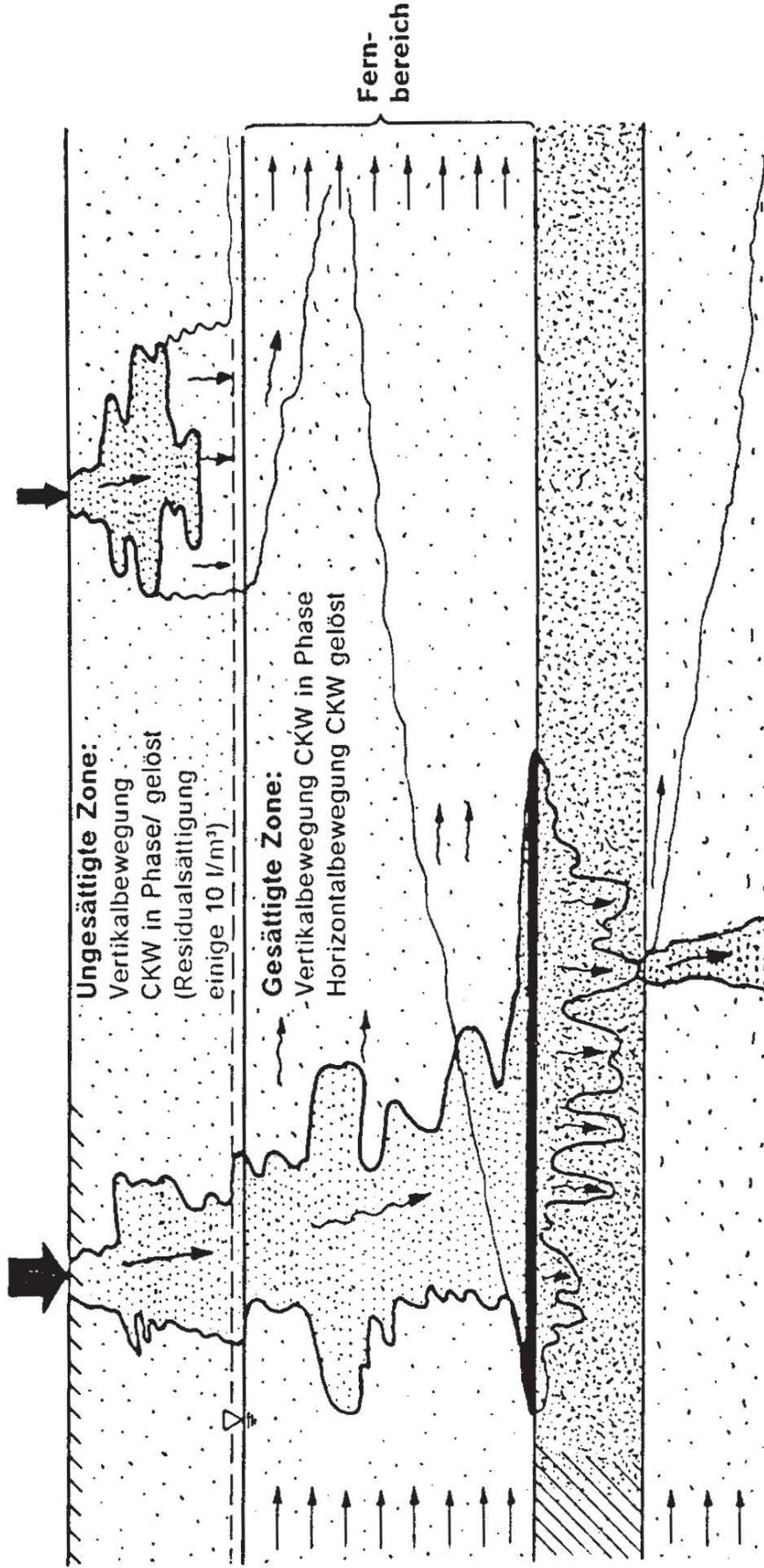


Bild 5: Versickerung und Ausbreitung chlorierter Kohlenwasserstoffe im Untergrund im Nahbereich des Schadensherdes [Kobus, H.; 1988]

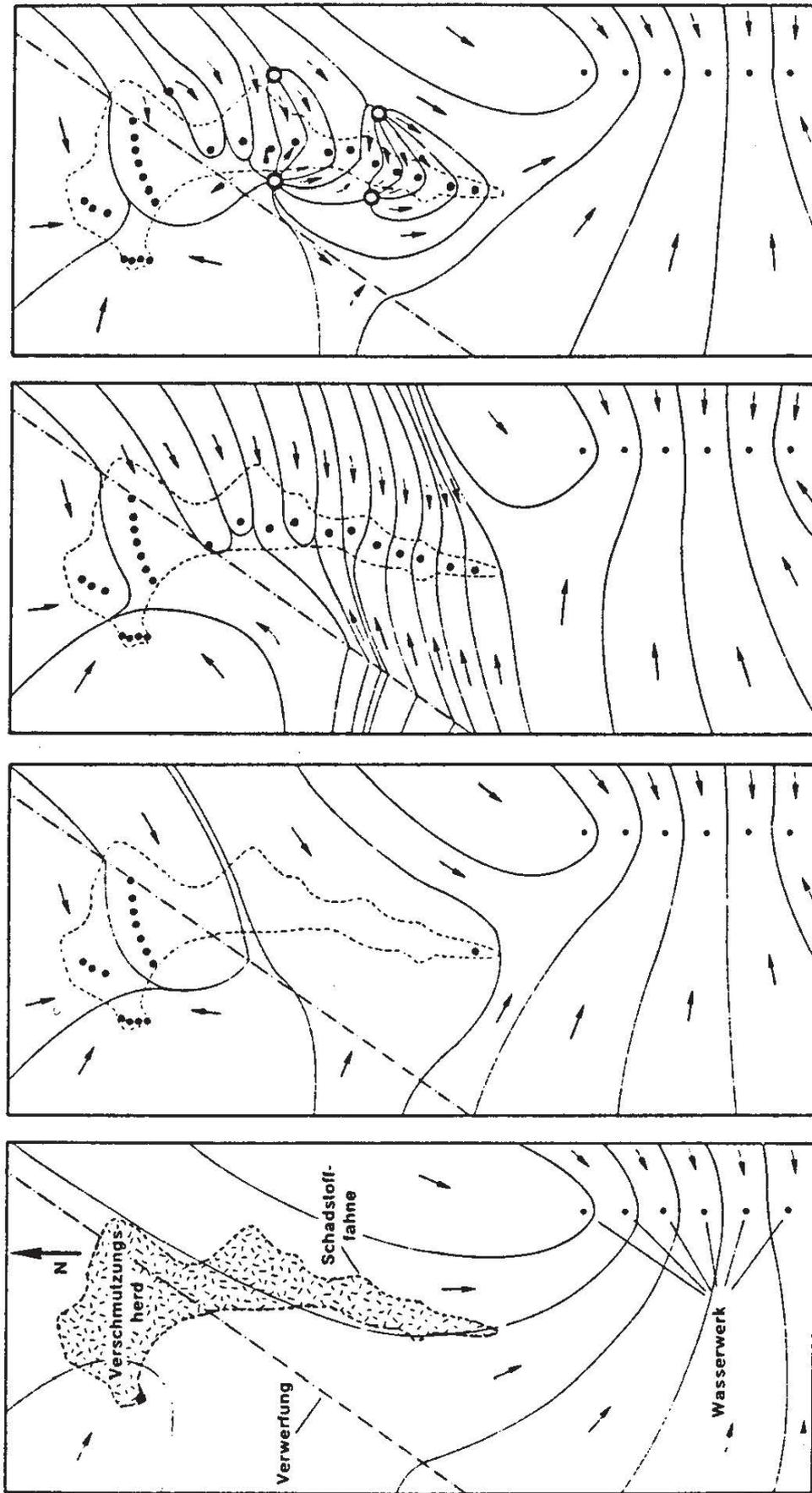


Bild 6: Unterschiedliche Strategien zur hydraulischen Sanierung einer Grundwasserkontamination [Herr, M.; Kinzelbach, W.]

Literaturhinweise

- Barczewski, B.; Marschall, P.: Untersuchungen zur Probenahme aus Grundwassermeßstellen; Wasserwirtschaft 80, H. 10, S. 506-513, 1990
- Herr, M.: Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter; Mitteilungsheft 63, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1986
- Kinzelbach, W.: Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser; Oldenburg Verlag, München, 1987
- Kobus, H.: "Ein Programm zur Erforschung aktueller Probleme in Grundwasserwirtschaft und Grundwasserschutz". Wasserwirtschaft, H. 11, Nov. 1987
- Kobus, H.: Grundwasserbelastung, Sanierungsbeispiele und Schutzmaßnahmen; Die Geowissenschaften, H. 11, S. 330-336, 1988
- Kobus, H.; Kinzelbach, W.: "Contaminant Transport in Groundwater" Proceedings IAHR-Symposium, Stuttgart, April 4-6, 486 Seiten, 1989
- Kobus, H.: "Den Schadstoffen auf der Spur, Transportprozesse im Grundwasser". Forschung, Mitteilungen der DFG 1/90, S. 18-21
- Redfield, A.; Frew, R.; Udvari, J.; Deaver, G.: Remote Sensing Applications by Consulting Engineers: Three Case Histories, Technical Papers; 1987 ACSM-ASPRS Annual Convention, vol. 1, März 1987
- Spitz, K.: Investigation and Control of Groundwater Pollution; Final Report ADB - 1348/72/DDJG/89, Groundwater Resource Consultants, Perth, Western Australia, 1989 (unpublished)

Teutsch, G.;
Barczewski, B.;
Kobus, H.:

"Evaluation of groundwater sampling techniques for the investigation and monitoring of contaminated sites", in Arendt, F. et al. (editors): "Contaminated Soil 90", Proceedings, KfK/TNO Conference on Contaminated Soil, Karlsruhe, December 10-14, 1990, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0- 7923-1058-6, S.563-573, Netherlands 1990,

"Altlasten Handbuch Teil I, Altlasten-Bewertung"; Wasserwirtschaftsverwaltung H. 18, Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg, Juni 1987

"Altlasten Handbuch Teil II, Untersuchungsgrundlagen"; Wasserwirtschaftsverwaltung H. 19, Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg, Juni 1987

"Die Verwendung von Karten und Luftbildern bei der Ermittlung von Altlasten"; Minister für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, 1987