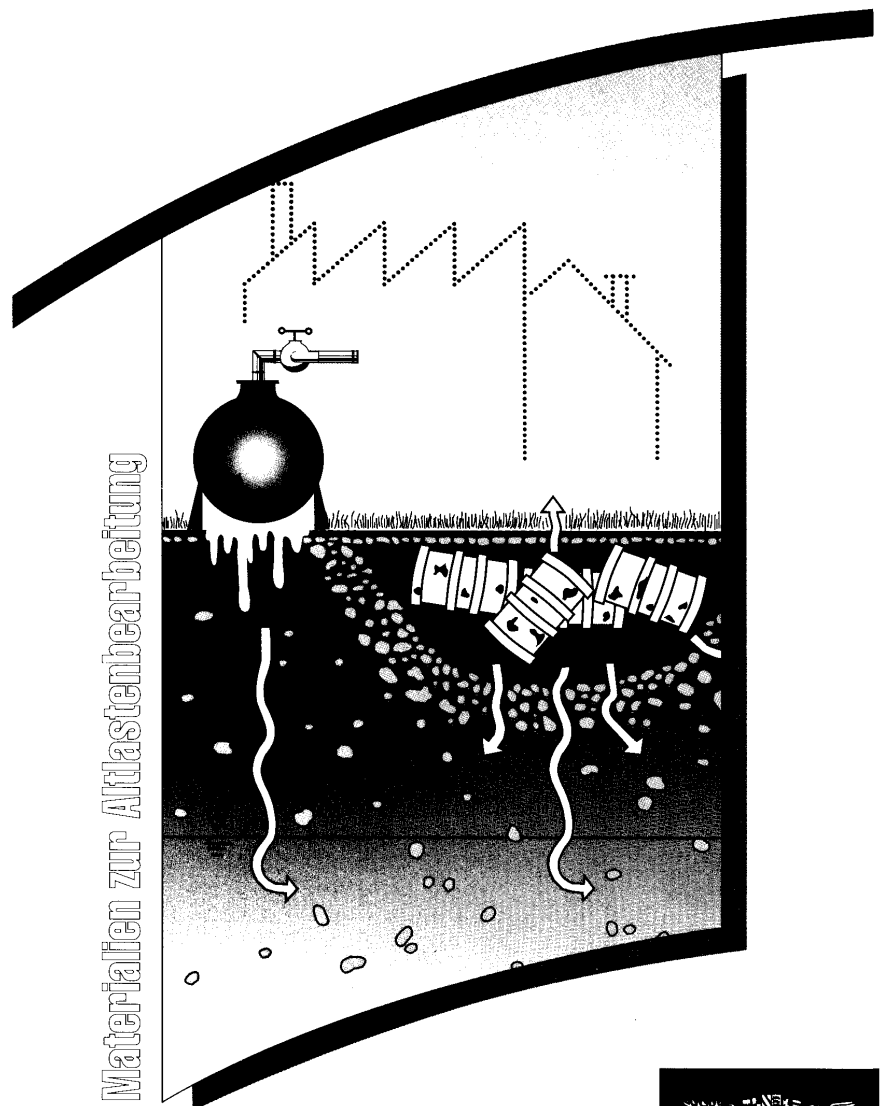


**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Methodensammlung



Materialien zur Altlastenbearbeitung



**BODEN
ABFALL
ALTLASTEN**



**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Methodensammlung



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

Karlsruhe 1997



Altlastenfachinformation im WWW

Impressum

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

Projektbearbeitung: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Abteilung 5 – Boden, Abfall, Altlasten
Referat 54 – Sanierung von Altlasten und Grundwasserschadensfällen
U. Kunzmann

Projektgruppe:
Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Leitung)
Geologisches Landesamt Baden-Württemberg
Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Reutlingen
Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Ravensburg
UW Umweltwirtschaft GmbH
Weber-Ingenieure Pforzheim GmbH

Verfasser: Planungsgemeinschaft
Umweltwirtschaft GmbH und Weber-Ingenieure
S. Denzel, T. Behnert
Weber-Ingenieure Pforzheim GmbH

T. Ertel, R. Dinkel, U. Trost
UW Umweltwirtschaft GmbH

Karlsruhe, November 1995

1. Ergänzung: Juli 1997

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

METHODEN ZUR GRUNDWASSERERKUNDUNG.....	2
AUSWERTUNG VORHANDENER INFORMATION	2
A 1: LUFTBILDAUSWERTUNG - LINEATIONEN	2
A 2: HYDROGEOLOGISCHE DATENRECHERCHE	5
ERSTELLUNG VON PROBENNAHMEPUNKTEN	8
B 1: KLEINBOHRVERFAHREN (D <100MM)	8
B 2: BOHRVERFAHREN (D >100MM)	11
B 3: GEOLOGISCHE AUFNAHME VON BOHRUNGEN.....	14
B 4: BAU VON KLEINMEßSTELLEN.....	17
B 5: AUSBAU VON GRUNDWASSERMEßSTELLEN.....	20
PROBENNAHME WASSER	24
C 1: ENTNAHME VON ZUFLUßGEWICHTETEN PUMPPROBEN	24
C 2: ENTNAHME VON HORIZONTIERTEN PUMPPROBEN	27
HYDROLOGISCHE METHODEN.....	31
D 1: STICHTAGSMESSUNG DES WASSERSTANDES	31
D 2: ABFLUßMESSUNG.....	34
HYDRAULISCHE METHODEN	37
E 1: PUMPVERSUCHE.....	37
E 2: SLUG-TEST.....	41
E 3: PULSE-TEST	44
E 4: DRILL-STEM-TEST	47
E 5: WD-TEST.....	50
E 6: DAS EINSCHWINGVERFAHREN.....	53
E 7: FLUID-LOGGING	56
E 8: AUFFÜLLVERSUCHE	59
E 9: MARKIERUNGSVERSUCHE	62
E 10: KORNGRÖßENANALYSE.....	68
E 11: PERMEAMETERVERSUCH.....	71
NUMERISCHE MODELLIERUNG	74
F 1: GRUNDWASSERMODELLE	74
GEOPHYSIKALISCHE FELDUNTERSUCHUNGEN.....	79
G 1: GEOELEKTRISCHE KARTIERUNG	79
G 2: WIDERSTANDSONDIERUNG	82
G 3: INDUZIERTER POLARISATION (IP)	85
G 4: EIGENPOTENTIALMETHODE (EP).....	88
G 5: ELEKTROMAGNETISCHE KARTIERUNG	91
G 6: REFRAKTIONSSEISMIK.....	94
G 7: REFLEXIONSSEISMIK	97
GEOPHYSIKALISCHE BOHRLOCHMESSUNGEN.....	100
H 1: FLOWMETER-LOG (FLOW)	100
H 2: TEMPERATUR-LOG (TEMP)	103
H 3: SALINOMETER-LOG (SAL).....	106
H 4: GAMMA-RAY-LOG (GRL)	109
H 5: KALIBER-LOG (CAL).....	112
H 6: ELEKTRIK-LOG (EL, FEL)	115
H 7: "POROSITÄTSABHÄNGIGE" VERFAHREN (D, FD; N; SV).....	118

LITERATURVERZEICHNIS	121
LITERATUR: AUSWERTUNG VORHANDENER INFORMATION	121
LITERATUR: ERSTELLUNG VON PROBENNAHMEPUNKTEN.....	122
LITERATUR: PROBENNAHME WASSER	123
LITERATUR: HYDROLOGISCHE METHODEN.....	125
LITERATUR: HYDRAULISCHE METHODEN.....	126
LITERATUR: NUMERISCHE MODELLIERUNG.....	131
LITERATUR: GEOPHYSIKALISCHE FELDUNTERSUCHUNGEN	131
LITERATUR: GEOPHYSIKALISCHE BOHRLOCHMESSUNGEN	133
ABBILDUNGSNACHWEIS	135
METHODEN ZUR FACHTECHNISCHEN KONTROLLE	138
ÜBERSICHT	138
I PHYSIKALISCHE METHODEN	139
I1 WASSERSTANDSMESSUNG MIT DRUCKSONDEN	139
I2 FASEROPTISCH-SPEKTROSKOPISCHE VERFAHREN.....	142
I3 ELEKTRISCHE VERFAHREN.....	145
LITERATUR ZU TEIL I.....	148
J PHYSIKALISCH-CHEMISCHE METHODEN	149
J1 PASSIVE SORBERSYSTEME	149
J2 PHOTOCHEMISCHE VERFAHREN	151
J3 CHEMISCH-PHOTOMETRISCHE VERFAHREN.....	154
J4 IONENSELEKTIVE VERFAHREN OHNE SELBSTKALIBRIERUNG.....	156
J5 IONENSELEKTIVE VERFAHREN MIT SELBSTKALIBRIERUNG.....	159
J6 ELEKTROCHEMISCHE VERFAHREN	162
LITERATUR ZU TEIL J.....	165
K BIOLOGISCHE METHODEN	166
K1 BIOTESTVERFAHREN ZUR ÜBERWACHUNG VON GRUND- UND SICKERWASSER.....	166
K2 IMMUNOASSAYS	168
LITERATUR ZU TEIL K.....	170
L SONSTIGE METHODEN	171
L1 DATENSAMMLER.....	171
LITERATUR ZU TEIL L.....	172
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	174
INDEXVERZEICHNIS	176

Methodensammlung

Materialien zur Altlastenbearbeitung

Band 20

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

Die vorliegende Methodensammlung ist Bestandteil der Fortschreibung der Altlastensystematik in Baden-Württemberg.

- Teil 1 beinhaltet
- Teil 2 beinhaltet

In Bearbeitung befinden sich Methoden zur:

- Gefahrenherderkundung
- Vor-Ort-Analytik

Es ist beabsichtigt, den Bestand der Methodensammlung laufend zu ergänzen. Die bestehenden Blätter werden mit fortschreitender technischer Entwicklung aktualisiert sowie an neu entstandene Rahmenbedingungen angepaßt.

Methoden zur Grundwassererkundung

Auswertung vorhandener Information

A 1: Luftbildauswertung - Lineationen

Allgemeine Information

Ziel:

Erhebung von Strukturen, die die Grundwasserbewegung beeinflussen können sowie Festlegung von Bohrpunkten für Grundwassermeßstellen.

Kosten/Aufwand:

Die Gesamtkosten einer Luftbildauswertung hängen von der betrachteten Gebietsgröße ab und betragen im Mittel ca. DM 2000.

Bewertung:

Die Ergebnisse besitzen einen detaillierten, hohen Informationsgehalt und stellen eine wichtige Beurteilungsgrundlage bei der Ermittlung von Schadstofftransportwegen dar. Die Methode muß jedoch immer ergänzt werden durch geologische und hydrogeologische Datenerhebungen im Untersuchungsgebiet.

Anwendung

Voraussetzungen:

Erfahrung bei der Luftbildauswertung; Luftbilder müssen eine geeignete Qualität besitzen, Maßstab ist erforderlich; Verlauf unterirdischer Strukturen wie Kanalgräben o.ä. im Vorfeld erhoben.

Theorie:

Ein Luftbild ist eine fotografische Momentaufnahme eines bestimmten Geländeausschnittes (Abb. A 1).

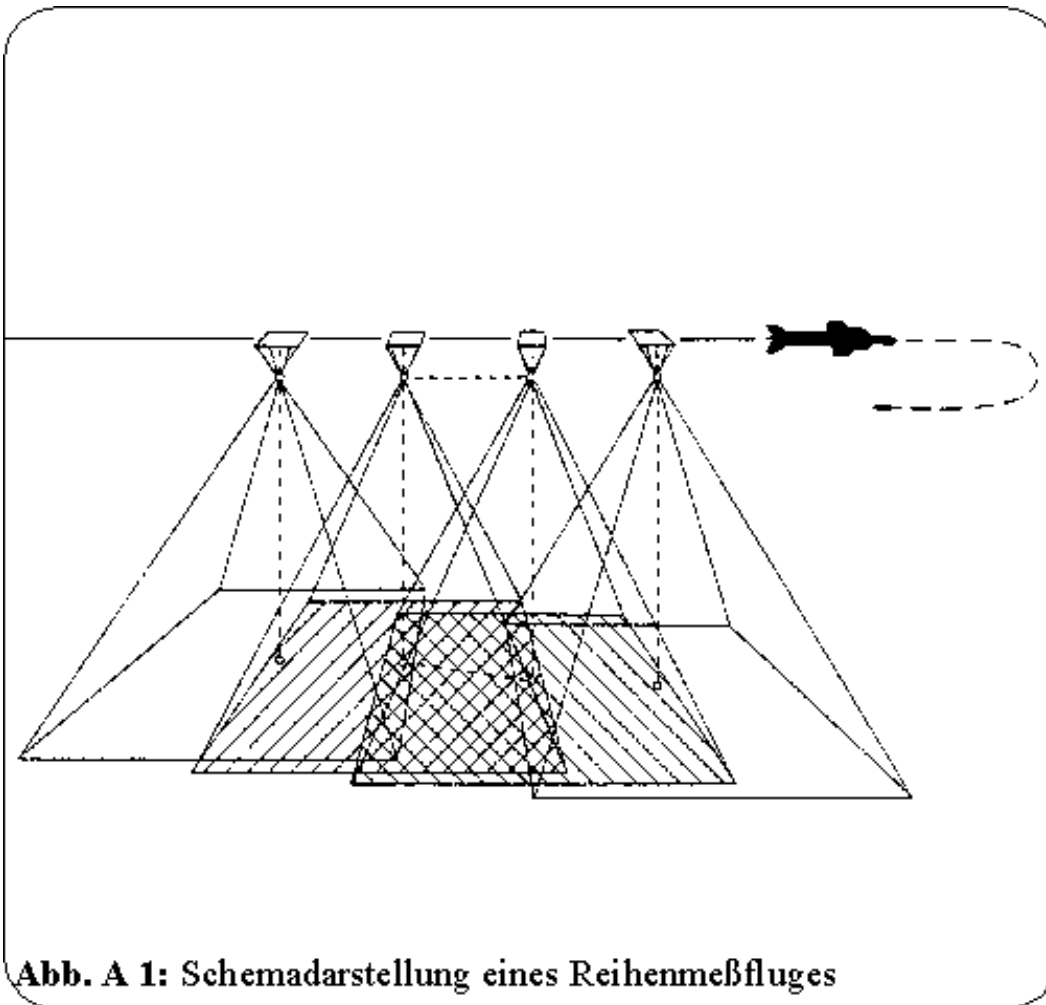


Abb. A1: Schemadarstellung eines Reihenmeßfluges

Zwei Typen von Luftbildern, die Schrägaufnahme und die Senkrechtaufnahme, lassen sich unterscheiden, wobei für die stereoskopische Auswertung nur letztere nutzbar ist. Auf Luftbildern mit geringem Vegetationsbestand sind geologisch bedingte Lineationen (z.B. Störungen, Klüfte) erkennbar. Entlang von Lineationen bestehen häufig erhöhte Wasserwegsamkeiten, daher sind Lineationen und deren Kreuzungspunkte für den Ansatz einer Grundwassermeßstelle gut geeignet.

Praxis:

Die Beschaffung der Luftbilder erfolgt beim Landesvermessungsamt (Luftbildstelle), Kampfmittelräumdienst (Regierungspräsidien), in Alliierten Luftbildarchiven und bei privaten Firmen. Als Luftbildmaterial werden Schwarzweiß-Reihenmeßbilder in den Formaten 18/18 oder 23/23 verwendet. Die Abbildungsmaßstäbe hängen von der Zielsetzung der projektbezogenen Überfliegung ab.

Auswertung:

- Durchsicht des Gesamtbestandes
- Auswahl geeigneter Luftbildfolgen
- Photogeologische Kartierung
Kartierkriterien:
 - Festgesteinseinheiten (Merkmale, Grenzen)
 - Grenze Locker/Festgestein
 - Ausstriche von Klüften/Störungen/Karsterscheinungen an der Erdoberfläche
 - Entwässerungsnetz
 - Wasseraus- und -zutritte
 - Vernässungsbereiche und Wasserflächen
 - Messung von Höhenunterschieden (z.B. Lage des Grundwasserspiegels in ehemaligen Baggerseen)
 - Bestimmung relative Höhenlage im Deponiebereich/Umgebung
- Darstellung der Kartiererergebnisse durch Übertrag auf topographische Karte (DGK 5 geeignet)
- Dokumentation der Arbeitsschritte
- Überprüfung der Ergebnisse durch Geländebegehung

Das Gerät zur Luftbildauswertung ist das Spiegelstereoskop. Zu unterscheiden ist die Auswertung von Einzelbildern und die stereoskopische Auswertung von Bildpaaren.

Einzelbildaufnahmen lassen vor allem das Erkennen zeitlicher Veränderungen im Gelände zu. Die stereoskopische Auswertung eines Bildpaares gibt einen räumlichen Eindruck des betrachteten Geländes. Bei der Auswertung ist es notwendig, daß "künstliche Fotolineationen" erzeugende Elemente wie Kanalgräben usw. von natürlichen Lineationen unterschieden werden.

Eine nach den genannten Kartierkriterien durchgeführte Luftbildauswertung kann Informationen über die Lage und die räumliche Verbreitung bevorzugter Wasserwegsamkeiten der oberflächennahen Schadstoffausbreitung (z.B. Störungen, alte Flußläufe, etc.) liefern.

Literatur:

- DODT (1987a): Leitfaden
- KRONBERG (1984): Lehrbuch
- REUL (1972): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Auswertung vorhandener Information

A 2: Hydrogeologische Datenrecherche

Allgemeine Information

Ziel:

Erarbeitung eines hydrogeologischen Arbeitsmodells, Festlegung von Bohrpunkten für Grundwassermeßstellen.

Kosten/Aufwand

Als Minimum ist hier ein Zeitaufwand von einem Tag anzusetzen, je nach Projektgröße kann der Aufwand auch deutlich höher ausfallen.

Bewertung

Die systematische Auswertung vorhandener Information während der hydrogeologischen Datenrecherche stellt ein unerläßliches Hilfsmittel zur optimalen planerischen und organisatorischen Projektgestaltung dar.

Anwendung

Voraussetzungen:

Untersuchungsziel der Grundwassererkundung ist klar definiert; notwendiger Informationsbedarf (Untersuchungsbereich) ist bekannt.

Theorie:

Das sorgfältige Studium und die systematische Auswertung bereits vorhandener Unterlagen reduzieren unnötige und kostenintensive Untersuchungen und können auch vor Fehlinterpretationen und Fehlmaßnahmen schützen.

Zur Beschreibung der geologisch-hydrogeologischen Situation, der räumlichen Abgrenzung der Verdachtsflächen sowie Art und Umfang potentieller Verunreinigungen sind folgende Unterlagen von Nutzen:

- Kartenwerke zur Topographie, Geologie und Hydrogeologie
- Geologische und hydrogeologische Gutachten
- Diplomarbeiten und Dissertationen zur regionalen Geologie und Hydrogeologie
- Hydrologische und wasserwirtschaftliche Daten
- Schichtenverzeichnisse von Bohrungen
- Ausbaupläne vorhandener Grundwassermeßstellen und Brunnen

- Rahmenpläne, Generalpläne, Sonderpläne zur Wasserwirtschaft, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallbeseitigung
- Bewirtschaftungspläne für Grundwasser
- Spezielle Standort- und Gebietsuntersuchungen zu wasserwirtschaftlichen und nutzungorientierten Bereichsplanungen
- Fachliteratur

Praxis:

Die hydrogeologische Datenrecherche steht in der Regel am Beginn einer Erkundung des Grundwassers. Die o.g. Informationsquellen stellen eine Fülle von Nachrichten bereit, die für den Bearbeiter Neuigkeitswert haben. Die vorhandenen Informationen können nur durch methodisches Arbeiten rationell bewältigt werden. Die Informationsbeschaffung kann erfolgen bei:

- Fachbehörden (GLA, LfU, Gewässerdirektion,...)
- Rechtsbehörden (RP, LRA,...)
- Kommunen
- Firmen, Zweckverbänden, Vereinigungen

Spezialliteratur kann in Bibliotheken, beim Geologischen Landesamt oder in Instituten der Hochschulen eingesehen werden. Zur Literaturrecherche stehen geowissenschaftliche Datenbanken zur Verfügung (z.B. Geoline = dt. geol. Datenbank; Georef = intern. geol. Datenbank).

Auswertung:

Bei der systematischen Auswertung ist zu berücksichtigen, daß die Unterlagen in Abhängigkeit von Bearbeiter und Zielsetzung Unterschiede aufweisen. Die hydrogeologischen Aussagen in den verschiedenen Dokumenten (Gutachten, Karten, etc.) sind entsprechend zu bewerten (Abb. A 2).

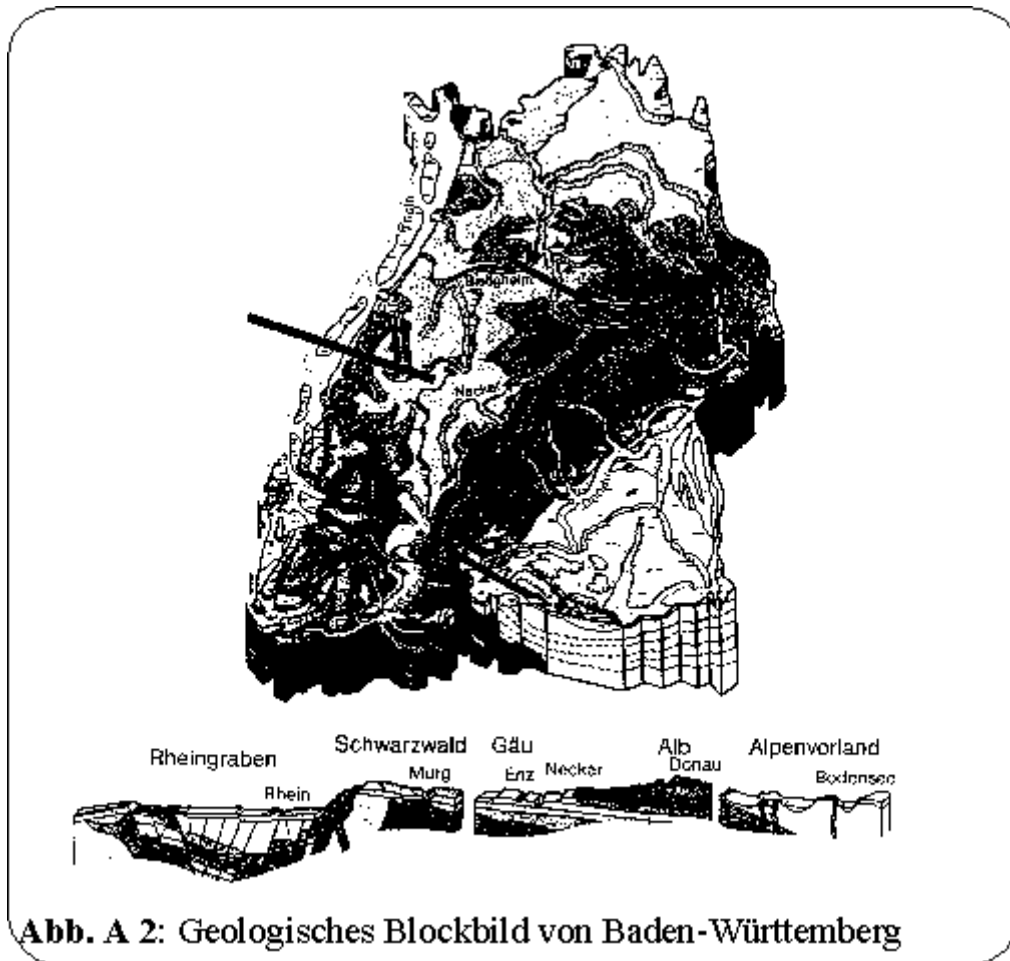


Abb. A 2: Geologisches Blockbild von Baden-Württemberg

Abb. A2: Geologisches Blockbild von Baden-Württemberg

Nach der hydrogeologischen Datenrecherche sind die hydrogeologischen Eckdaten des Untersuchungsgebietes in ein Arbeitsmodell eingearbeitet worden. Die hydrogeologischen Besonderheiten des Untersuchungsgebiets sind bekannt.

Literatur:

- DVWK (1989): Fachbuch
- GEYER & GWINNER (1991): Lehrbuch
- GLA (1985): Sonderveröffentlichung
- GLA (1994): Informationsschriften
- LFU (1993): Symp. Modellstandortprogramm

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Auswertung vorhandener Information

Erstellung von Probennahmepunkten

B 1: Kleinbohrverfahren (d <100mm)

Allgemeine Information

Ziel

Ermittlung der Untergrundverhältnisse, Aufschlußprofil, Festlegung von Bohrpunkten, Einrichten von Grundwasserbeobachtungsmeßstellen (max. 2" - Ausbaudurchmesser) und -meßstellen im Lockergestein.

Kosten/Aufwand

Kosten je nach Baustelleneinrichtung, Sicherheitsvorkehrungen und Bohrtiefe und -verfahren zwischen DM 60 und DM 110 / lfm.

Bewertung

Kleinbohrungen sind eine kostengünstige und äußerst mobile Technik zur Schaffung von Untergrundaufschlüssen bei nahezu allen Untergrundverhältnissen.

Anwendung

Voraussetzungen:

Gelände zugänglich; Erkundung des Verlaufs von Leitungen im Untergrund im Vorfeld notwendig; geringer Flurabstand des Grundwassers; Untergrund nicht steinig-felsig oder aus verfestigtem Lockergestein.

Kleinbohrungen zum Aufsuchen von Grundwasser sind unter Vorlage der zur Beurteilung des Eingriffs in den Grundwasserhaushalt erforderlichen Unterlagen entsprechend § 37 WG anzuzeigen (Bohranzeige). Das Anzeigeverfahren sollte 6 - 8 Wochen vor geplantem Bohrbeginn bei der örtlich zuständigen unteren Wasserbehörde eingeleitet werden. Bei Aufschlußarbeiten in Wasserschutzgebieten sind die Richtlinien für Trink- und Heilwasserschutzgebiete zu beachten (u.a. DVGW, 1975).

Theorie:

Eine Bohrung ist ein Aufschluß, der mit verschiedenen technischen Verfahren zum Lösen und Fördern des Bohrgutes hergestellt wird. Bei Kleinbohrverfahren werden in der Regel Schlitz- bzw. Rammkernsonden zur Bohrkerngewinnung eingesetzt. Die Sonden werden mittels mobilem Motor-, Elektro-, oder Luftdruckhammer in den Boden eingerammt und anschließend wieder gezogen. Während der Planung der Kleinbohrarbeiten vor Ort ist die Verschleppungsgefahr von Schadstoffen (z.B. durch hydraulische Stockwerkverbindung) auszuschließen.

Praxis:

Die Kleinbohrung ist mit Ausnahme eines felsig-steinigen Standortes nahezu an jedem Standort einsetzbar. Die Arbeiten werden manuell von mindestens zwei erfahrenen Geotechnikern durchgeführt. Je nach Bohrdurchmesser und Untergrundbeschaffenheit lassen sich maximale Tiefen zwischen 8-10m erreichen. Das in der Kernsonde verbliebene, zu beschreibende Material (s. B 3) gibt Aufschluß über die Untergrundverhältnisse und bietet die Möglichkeit, Feststoffproben aus definierten Höhen zu entnehmen (DVGW - Merkblätter W 114, W 115).

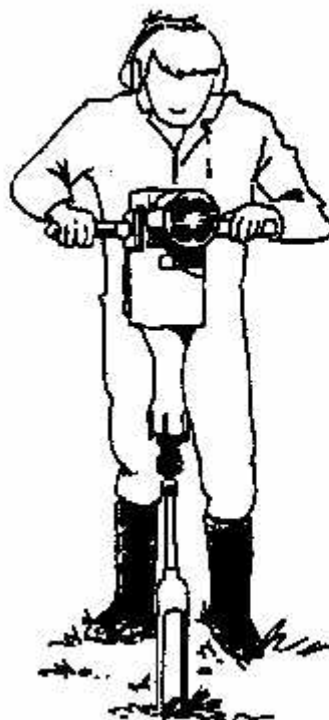


Abb. B 1: Kleinbohrung

Abb. B1: Kleinbohrung

Die Wasserführung einzelner Schichten und die Tiefenlage einer möglicherweise erreichten Grundwasseroberfläche ist gesondert zu vermerken. Nach Abschluß der Probennahme ist das Bohrloch bei fehlender weiterer Verwendung (Ausbau, s. B 4) fachgerecht mit grundwasserneutralen Materialien zu verschließen. Danach erfolgt das Einmessen der Kleinbohrung nach Rechts- / Hochwerten und der Ansatzhöhe über NN. Der Informationsgehalt von Kleinbohrungen kann durch Kernverlust reduziert werden, zudem müssen bei mechanischen Rammverfahren durch Stauchungen auftretende Tiefenverzerrungen berücksichtigt werden.

Auswertung:

Der gesamte Bohrvorgang inklusive Planung ist sorgfältig zu dokumentieren. Abschließend erfolgt eine geologische bzw. geotechnische Bewertung der Untergrundverhältnisse. Die Beschreibung der Bohrproben erfolgt in Form von Schichtenverzeichnissen und Bohrprofilen (s. B 3). Das Verfahren kann eingesetzt werden für:

Informationsgewinnung, kleinräumig

Erstellen von Kleinmeßstellen (s. B 4) zur Probennahme (s. C 1) und Beobachtung des Grundwasserstandes (s. D 1), Festlegung von Bohrpunkten in heterogenen Aquiferstrukturen

Informationsverdichtung

Die Ergebnisse können bei geringer Überdeckung zur näheren Beurteilung komplexer räumlicher Aquiferverhältnisse herangezogen werden. Bestehende Datensätze können, z.B. im Rahmen von Modellierungsvorhaben (s. F 1) in Talablagerungen, verdichtet werden.

Literatur:

- DIN 4020, 4021, 4022, 4023, 18196: Technische Richtlinien
- DVGW W 114, W 115, W 116: Merkblätter
- PRINZ (1991): Lehrbuch
- ULRICH (1982): Fachbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Erstellung von Probennahmepunkten

B 2: Bohrverfahren (d >100mm)

Allgemeine Information

Ziel

Aufschlußprofil, Einrichtung von Grundwassermeßstellen.

Kosten/Aufwand

Kosten je nach Baustelleneinrichtung, Sicherheitsvorkehrungen und Bohrtiefe, -durchmesser und -verfahren von DM 300 - DM 600 / lfm ohne Ausbau, Preis unterliegt starken konjunkturellen Schwankungen.

Bewertung

Bohrungen erlauben Untergundaufschlüsse bei nahezu allen Untergrundverhältnissen. Zur Grundwasserbeobachtung, Durchführung hydraulischer Tests, Pumpversuchen und wiederholten Probennahme kann das erbohrte Bohrloch zu einer Grundwassermeßstelle ausgebaut werden.

Anwendung

Voraussetzungen:

Gelände zugänglich; Bohrungen zum Aufsuchen von Grundwasser sind unter Vorlage der zur Beurteilung des Eingriffs in den Grundwasserhaushalt erforderlichen Unterlagen entsprechend § 37 WG Abs. 2 und Tiefbohrerlaß Ziff. 2.1.2 anzuzeigen (Bohranzeige). Das Anzeigeverfahren sollte 6 - 8 Wochen vor geplantem Bohrbeginn bei Bohrungen von weniger als 100m Endteufe der örtlich zuständigen unteren Wasserbehörde eingeleitet werden. Bohrungen von mehr als 100m Tiefe unterstehen nach dem Bundesberggesetz von 1980 (letzte Änderung 1990) der Bergaufsicht durch die zuständige Bergbehörde. Alle durch mechanische Kraft angetriebene Bohrungen sind nach § 4 Lagerstättengesetz von 1934 (letzte Änderung 1974) 2 Wochen vor Beginn der Arbeiten dem Geologischen Landesamt anzuzeigen.

Die Verwendung von Bohrspülungen und Spülmittelzusätzen sind Gewässerbenutzungen, die einer wasserrechtlichen Gestattung bedürfen (§§ 2 und 7, WHG), die Gestattung ist bei der unteren Wasserbehörde zu beantragen. Bei Aufschlußarbeiten in Wasserschutzgebieten sind die Richtlinien für Trink- und Heilwasserschutzgebiete zu beachten (u.a. DVGW, 1975).

Theorie:

Bohrungen zum Bau von Grundwassermeßstellen sind nach Möglichkeit im Trockenbohrverfahren niederzubringen. Bei Notwendigkeit einer Spülung ist primär eine Luftspülung vorzusehen. Im wesentlichen lassen sich unterscheiden:

- Bohrungen ohne Spülung
 - Greiferbohrung
 - Schappenbohrung
 - Trockenbohrung (Ramm-, Schlauchkernbohrung)
- Bohrungen mit Spülung (Wasser, Luft)
 - Lufthammerbohrung
 - Meißelbohrung
 - Rotationskernbohrung (Abb. B 2)
 - Im-Loch-Hammer Verfahren

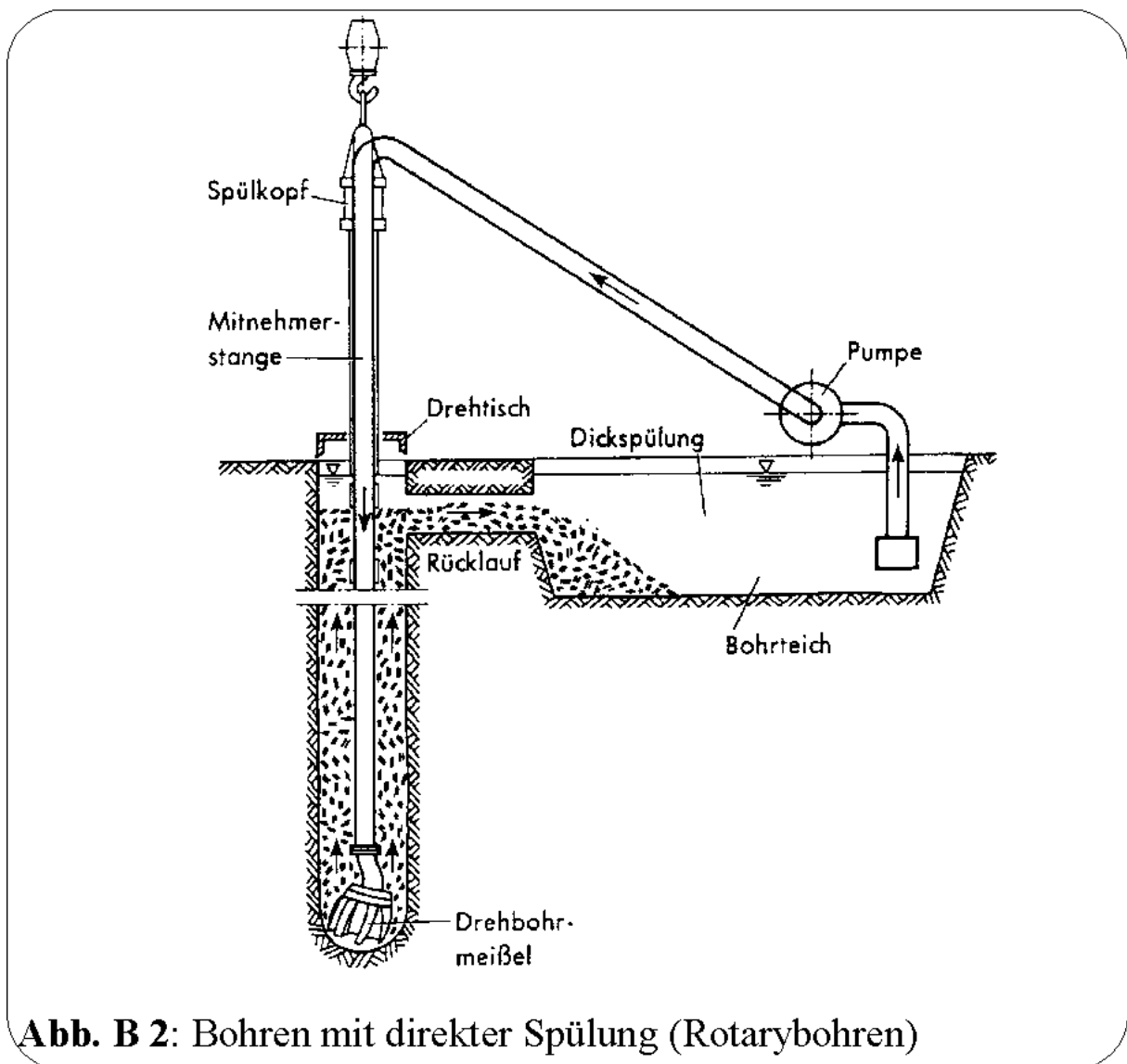


Abb. B 2: Bohren mit direkter Spülung (Rotarybohren)

Abb. B2: Bohren mit direkter Spülung (Rotarybohren)

Die Bohrverfahren und Geräte sind in DIN 4021 und DVGW W 115 zusammengestellt und werden in PRINZ (1991) kommentiert. Die Wirkungsweise der Spülszusätze wird in DVGW W 116 beschrieben. Eine qualitative Wertung bezüglich der Altlastenproblematik ist LFU Ba.-Wü. (1993) zu entnehmen.

Praxis:

Auswahlkriterien des Bohrverfahrens:

- Verschleppungsgefahr von Schadstoffen (z. B. durch hydraulische Stockwerkverbindung)
- Kern- und Probengewinn (DVGW W 114); Möglichkeit der geologischen Aufnahme der Bohrungen (s. B 3)
- Verschluß von Trennfugen durch Bohrspülung ist zu vermeiden
- geeignete Bohr- und Ausbaudurchmesser für Bohrlochvermessungen, Versuche zur Hydraulik und der Grundwasserprobennahme
- Berücksichtigung der Tiefe der Bohrung sowie der bohrtechnischen Ansprüche des Untergrundes
- Wirtschaftlichkeit

Nach Abschluß der Bohrarbeiten ist die Bohrung nach Rechts- / Hochwerten und der Ansatzhöhe in m über NN einzumessen.

Auswertung:

Der gesamte Bohrvorgang inklusive der Planungsphase und aller in diesem Zusammenhang angefallenen Nebenarbeiten ist sorgfältig zu dokumentieren. Die Beschreibung von Bohrproben erfolgt in Form von Schichtenverzeichnissen und Bohrprofilen (s. B 3).

Literatur:

- DIN 4020, 4021, 4022, 4023: Technische Richtlinien
- DVGW W 114, W 115, W 116: Merkblätter
- PRINZ (1991): Lehrbuch
- LFU Ba.-Wü (1993): Symp. Modellstandortprogramm
- ULRICH (1982): Fachbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Erstellung von Probennahmepunkten

B 3: Geologische Aufnahme von Bohrungen

Allgemeine Information

Ziel:

Lithologische Ansprache und stratigraphische Einstufung des Untergrundes sowie hydrogeologische Beurteilung der Schichtfolge.

Kosten/Aufwand:

Kosten für eine Bohrkernaufnahme bewegen sich in Abhängigkeit von der Qualität der geforderten Aussagen zwischen DM 15 und DM 45 / lfm.

Bewertung:

Die Bohrkernaufnahme ermöglicht eine direkte und unmittelbare Betrachtung der Untergrundverhältnisse und erlaubt eine erste geotechnische oder hydrogeologische Bewertung.

Anwendung

Voraussetzungen:

Ausbildung und Erfahrung in der Ansprache von Boden und Fels; Bohrkernne müssen möglichst ungestört und frisch vorliegen.

Theorie:

Die Beschreibung von Bohrproben erfolgt in Form von Schichtenverzeichnissen und Bohrprofilen. Die Schichtenverzeichnisse sollten Angaben enthalten über:

- Rechts- / Hochwert und Höhe über NN des Bohransatzpunktes
- Schichtgrenze (Höhe in m ü. NN)
- Mächtigkeit der erbohrten Schicht
- Litho- und biostratigraphische Einstufung
- Gesteinsbeschreibung nach Vorgaben (DIN 4021, 4022)
- Beschreibung und Beurteilung der Trennfugen hinsichtlich hydraulischer Eigenschaften
- Photodokumentation der Bohrkernne
- Angaben zu den für spezielle Untersuchungen entnommenen Proben (Tiefe, Art, Menge, Kerngewinn)
- Technische Bohrdaten

Praxis:

Im wesentlichen lassen sich unterscheiden:

a) Beschreibung des Bohrkleins:

Bei Bohrungen mit Spülung ohne Kerngewinn wird das anfallende Bohrklein aus dem Bohrloch ausgetragen. Zur lithologischen Einordnung des Bohrkleins (Zerbrechungsgrad) sind exakte Bohrdaten (z.B. Meisseldruck, Bohrfortschritt) erforderlich, geophysikalische Bohrlochmessungen (s. H 1 - H 7) können hilfreich sein. Hinweise auf durchteufte Schichtgrenzen kann u.U. der Farbumschlag der Spülung liefern.

b) Beschreibung des Bohrkerns:

Bei Kernbohrungen können Gesteinsgefüge und Trennfugen (Klüfte etc.) beurteilt werden. Die Raumlage hydraulisch wichtiger Trennfugen kann an orientiert entnommenen Bohrkernen bestimmt werden. Der Informationsgehalt von Kernbohrungen kann durch Kernverlust reduziert werden. Die Erfassung des Bohrfortschritts, die laufende Beobachtung der Spülung und die nachträgliche Messung der Tiefe des Bohrlochs ermöglichen eine richtige Einordnung der geförderten Kernabschnitte.

Zur Dokumentation der Schichtenverzeichnisse ist eine ausreichende Anzahl von Rückstellproben zu entnehmen. Die Bohrkerns werden mit einem Pfeil in Richtung des laufenden Bohrfortschritts markiert und dauerhaft beschriftet. Bei Bohrungen im Festgestein können anhand der Bohrkerns Verwitterungsprofile nach den von WALLRAUCH (1969) eingeführten Kriterien aufgenommen werden (vgl. auch PRINZ, 1991).

Auswertung:

Die Kombination von gezeichnetem Schichtprofil, Erfassung der wichtigsten Kerndaten in Spalten und knapper textlicher Gesteinsbeschreibung gilt als eine in der Praxis bewährte Präsentation der geologischen Aufnahme von Bohrungen. Anleitungen zur zeichnerischen Darstellung der Bohrkerns als Bohrprofile werden in DIN 4023 gegeben (Abb. B 3). Eine weitergehende Interpretation der Untergrundverhältnisse aus den Punktdaten mehrerer Bohrungen kann über Profilkorrelationen und Blockbilddarstellungen erfolgen.

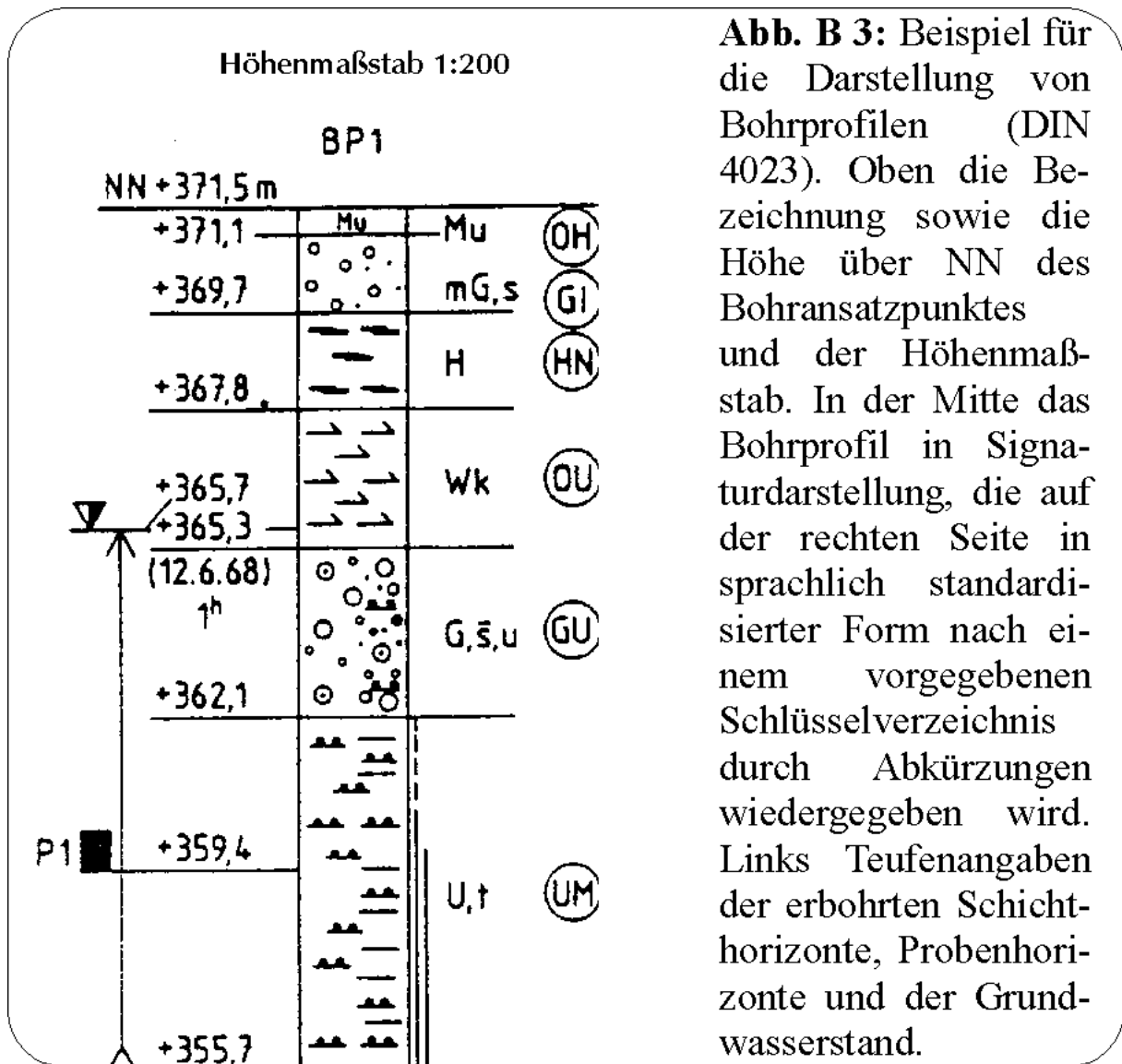


Abb. B3: Beispiel für die Darstellung von Bohrprofilen

Auf diesen Gebieten ist der Einsatz geowissenschaftlicher EDV-Programme weit verbreitet. Eine Zusammenstellung der Software kann u.a. BDG (1991) entnommen werden.

Literatur:

- BIESKE (1992): Fachbuch
- ULRICH (1982): Fachbuch
- BDG (1991): Katalog Software
- DIN 4020, 4021, 4022, 4023, 18196, 18300: Technische Richtlinien
- PRINZ (1991): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Erstellung von Probennahmepunkten

B 4: Bau von Kleinmeßstellen

Allgemeine Information:

Ziel:

Herstellung von Grundwasseraufschlüssen zur Beobachtung des Grundwasserstandes und zur Probennahme.

Kosten/Aufwand:

Kosten für Ausbau einer Kleinmeßstelle inkl. Bohrkosten ca. DM 150 bis DM 350 / lfm.

Bewertung:

Kostengünstige und äußerst mobile Technik zur Herstellung von oberflächennahen Grundwasseraufschlüssen auch in schwer zugänglichen Gebieten.

Anwendung:

Voraussetzungen:

Bohrung nach B 1 liegt vor, geringer Flurabstand.

Theorie:

Eine Kleinmeßstelle ist eine Meßstelle, die mit Hilfe von Kleinbohrverfahren hergestellt wird. Sie erreicht daher oft nicht die Anforderungen, wie sie nach DVGW W 121 an eine Grundwassermessstelle zu stellen sind und ist somit keine entsprechend DIN 4046 und DIN 4049 (Teil 1) definierte "Anlage zur Ermittlung hydrologischer Werte des Grundwassers".

In einer Kleinmeßstelle können keine hydraulischen Tests durchgeführt werden. Nach einer durchgeführten Funktionskontrolle der Kleinmeßstelle kann nicht auf hydraulische Kenndaten des Aquifers geschlossen werden.

Aufgrund des geringen Ausbaudurchmessers können in Kleinmeßstellen nur relativ förder-schwache Pumpensysteme eingebaut werden. Der geringe Förderstrom führt nur zu einem kleinen Absenktrichter während des Pumpvorgangs, die erfaßte Abstrombreite a ist daher häufig sehr gering. Die Aussagekraft einer entnommenen Grundwasserprobe ist meist nur punktuell gültig. Für die Eingabe von Tracersubstanzen im Rahmen eines Markierungsversuches (s. E 9) sind Kleinmeßstellen als Impfpiegel verwendbar.

Praxis:

In der Praxis ergibt sich das Einsatzfeld von Kleinmeßstellen als kostengünstige Herstellung eines Grundwasseraufschlusses. Kleinmeßstellen sind bei oberflächennahen Grundwasserständen in einem gut durchlässigen, filterstabilen Untergrund besonders in schwer zugänglichen Gebieten eine gut geeignete Möglichkeit, Grundwasserproben zu gewinnen und den Grundwasserstand zu beobachten (s. D 1).

Der schematische Aufbau einer Kleinmeßstelle ist in Abb. B 4 dargestellt. Hierzu sollten Bohrlöcher in den Untergrund mittels Kleinbohrverfahren vorgebohrt werden (s. B 1). Der Durchmesser des Ausbaumaterials liegt zwischen 5/4" und 2". Der vorhandene Ringraum kann nachfolgend mit Filterkies (Korngröße abhängig von der verwendeten Schlitzweite) aufgefüllt werden. Aufgrund des geringen Durchmessers des Ringraumes kann nach häufig wiederholten Beprobungen eine Selbstabdichtung der Filterstrecke auftreten. Die Abdichtung des Ringraumes gegen Zutritte von Oberflächenwasser erfolgt durch quellfähige Materialien (z.B. Bentonit). Bezüglich der Meßstellenausbaumaterialien gelten die Empfehlungen nach DVWK (1990c). Nach Fertigstellung der Kleinmeßstelle muß eine Funktionskontrolle durch Klarpumpen, eine exakte Positionierung nach Gauß-Krüger-Koordinaten sowie eine Einmessung nach der Höhe erfolgen. Die Entnahme von Wasserproben erfolgt entweder mittels Saug- (max. Steighöhe 7-8m unter GOK) oder Tauchpumpen und ist zu protokollieren.

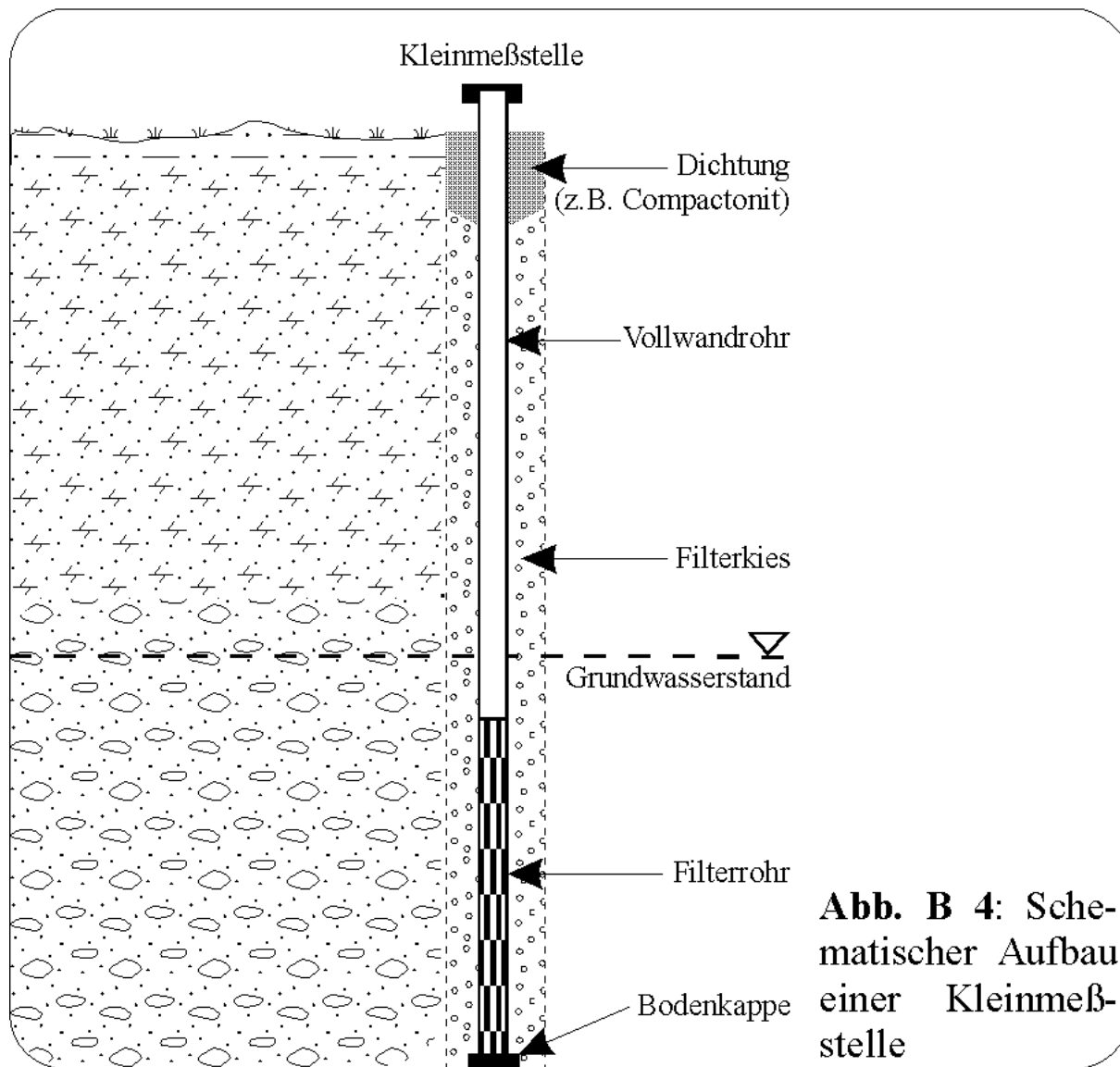


Abb. B 4: Schematischer Aufbau einer Kleinmeßstelle

Abb. B4: Schematischer Aufbau einer Kleinmeßstelle

Auswertung:

Anfertigung eines Ausbauplanes; Grundwasserstandsmessung (s. D 1).

Literatur:

- DIN 4046, 4049: Technische Richtlinie
- DVWK (1990c): Fachbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Erstellung von Probennahmepunkten

B 5: Ausbau von Grundwassermeßstellen

Allgemeine Information

Ziel:

Herstellung von Grundwasseraufschlüssen zur Probennahme und zur Durchführung hydraulischer Tests.

Kosten/Aufwand:

Kosten für Ausbau der Grundwassermeßstelle inkl. Bohrkosten ca. DM 800 bis DM 1000 pro Bohrmeter.

Bewertung:

Der relativ hohe Kostenaufwand (Bohrung, Ausbau) ist aufgrund der Möglichkeit der wiederholbaren Gewinnung von Grundwasserproben (Reproduzierbarkeit) und der Durchführung hydraulischer Tests und Pumpversuchen gerechtfertigt.

Anwendung

Voraussetzungen:

Bohrung nach B 2 liegt vor; Bohrlochdurchmesser ist auf Ausbaudurchmesser abgestimmt

Theorie:

Eine Grundwassermeßstelle ist nach DIN 4046 und DIN 4049 Teil 3 als eine "Anlage zur Ermittlung hydrologischer Werte des Grundwassers" definiert. (Hydrologische Werte: Grundwasserstand und Angaben über die Grundwasserbeschaffenheit).

"Die Grundwassermeßstellen müssen vergleichbare Erkundungs- und Analyseergebnisse liefern. Um dies zu erreichen, ist das Grundwasserbeschaffenheitskonzept der LfU Ba.-Wü. zu berücksichtigen und die Meßstellen alle nach dem gleichen Schema auszubauen und mit den Meßstellennummern der LfU Ba.-Wü. zu versehen." (aus: LfU Ba.-Wü., 1993, Modellstandortprogramm).

Bei Bohrarbeiten im Nahfeld von Altlasten muß die Verbindung zweier Grundwasserstockwerke vermieden werden. Aus Gründen der Meßstellenhydraulik würde die Beprobung einer aquiferverbindenden Meßstelle zu einer falschen Einschätzung der Ausdehnung einer Grundwasserkontamination führen, daher ist in diesem Fall ein stockwerksspezifischer Ausbau zu fordern. Nach Erkundung der Untergrundverhältnisse mittels Bohrungen und Herstellung entsprechender Untergrundaufschlüsse (s. B 2) werden durch den Ausbau je ein Aquifer zur Beobachtung und Beprobung des Grundwassers erschlossen.

Prinzipiell ist das Einrichten einer Grundwassermeßstelle immer mit einer gewissen Veränderung der natürlichen Grundwasserströmung im unmittelbaren Umfeld der Meßstelle verbunden. Der genaue Regelausbau für den Fall eines ungespannten Grundwasserleiters ist der Abbildung B 5 auf der nächsten Seite zu entnehmen. Nach DVGW Merkblatt W 121 (1988) ist zu fordern: Bohrdurchmesser = Ausbaudurchmesser + 2 x 80mm.

Der Innendurchmesser sollte mindestens 5" betragen (Einbau Unterwassermotorpumpen), auf den Einbau eines Sumpfrohrs soll verzichtet werden, da sich dort Spurenstoffe anreichern können, die die Wasseranalytik beeinflussen. Bei ungespannten Grundwasserleitern ist der gesamte Grundwasserraum bis über den obersten zu erwartenden Grundwasserstand zu verfiltern. Bei gespannten Grundwasserleitern endet die Filterstrecke an der Oberkante des betroffenen Grundwasserkörpers.

Es ist dafür zu sorgen, daß genügend Abstandshalter zur Zentrierung der Verrohrung benutzt werden, die Rohrstrecke wird nach unten durch eine Bodenkappe abgeschlossen. Um Setzungseinflüsse im Ringraum zu berücksichtigen, ist die Filterkiesschüttung mindestens 1m über das Filterrohr zu führen. Die Wahl der Filterkieskörnung und der Filterschlitzweite ist auf die Korngrößenverteilung des Aquifers abzustimmen (BIESKE & WANDT, 1977). Die Kieskörnung soll mindestens das zweifache der Schlitzweite betragen und nicht zu klein gewählt werden, da ab einer Korngröße < 4 mm die Gefahr der Selbstabdichtung der Meßstelle wächst. Zwischen der, die Meßstelle nach oben abschließenden, Dichtstrecke und dem Filterkies ist ein Gegenfilter (abgestufte Korngrößen) einzubauen.

Eine umfassende Übersicht zum Thema Meßstellenausbaumaterialien ist in DVWK (1990c) erschienen. Als Ausbaumaterial wird in der Regel PVC-hart verwendet. Sind organische Schadstoffe (z.B. LCKW > 10mg/l) im Grundwasser vorhanden, sollte Edelstahl verwendet werden (LFU, 1993). Abschließend ist die Grundwassermeßstelle entsprechend den Gegebenheiten am Bohrpunkt mit einem Überflurausbau oder einem Unterflurausbau (s. DVGW, 1988) zu versehen. Mit dem Klarpumpen und der anschließenden Funktionskontrolle sollte spätestens 48 Stunden nach Bauende begonnen werden.

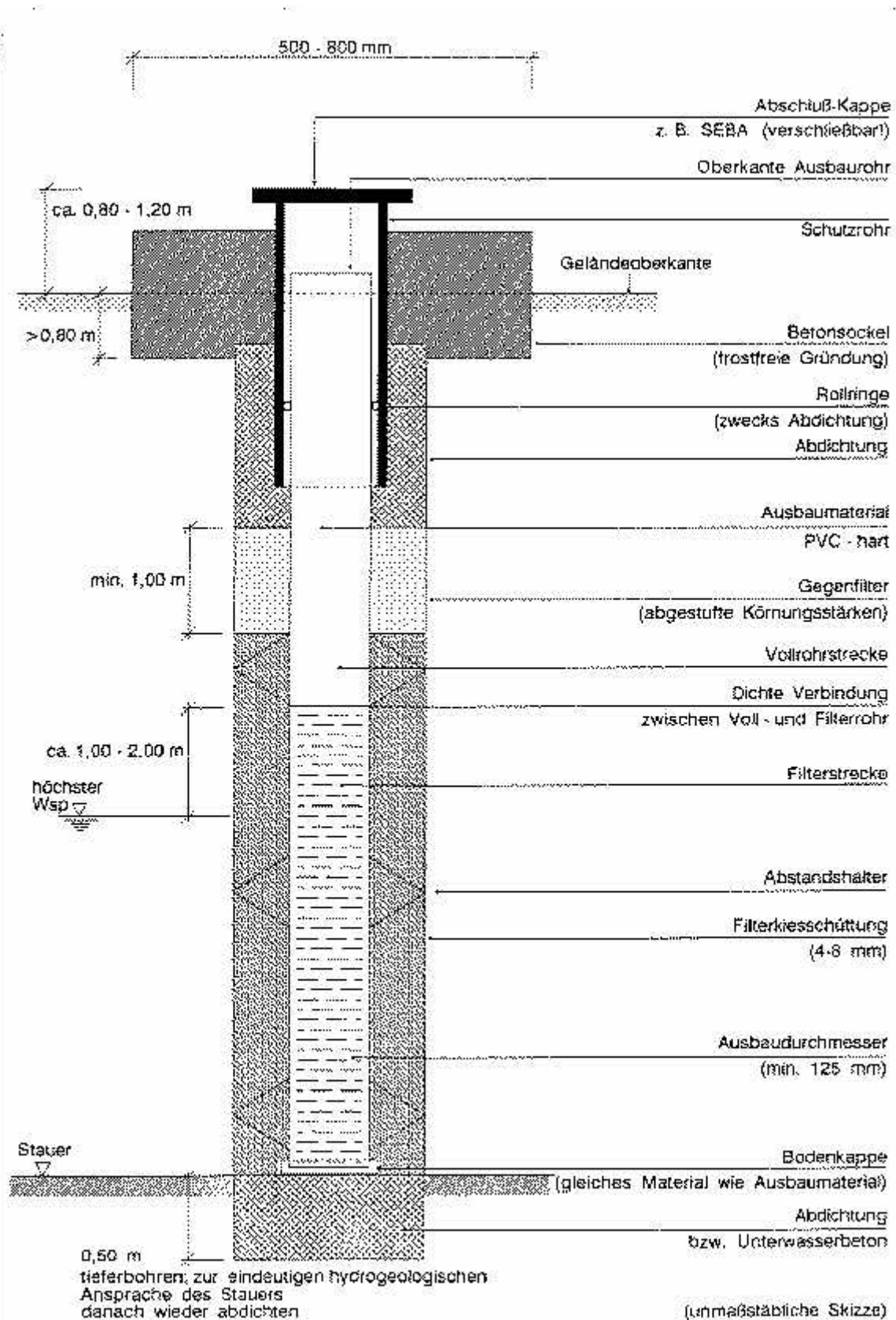


Abb. B5. Regelausbau einer Grundwassermeßstelle im ungespannten Grundwasserleiter

Abb. B5: Regelausbau einer Grundwassermeßstelle im ungespannten Grundwasserleiter

Praxis:

Nach Fertigstellung des Bohrlochs bis zur Endtiefe wird der Ausbau der Grundwassermeßstelle festgelegt. Zur Klärung des Ausbaus können geophysikalische Bohrlochmessungen notwendig sein (s. H 1 - H 7). Der endgültige Ausbau wird in Absprache mit den zuständigen Fachbehörden festgelegt. Die Ausbauarbeiten sind fachkundig zu überwachen.

Auswertung:

Dokumentation der Untergrundverhältnisse durch ein Schichtenverzeichnis (s. B 3), Anfertigung eines Ausbauplanes.

Literatur:

- BIESKE & WANDT (1977): Fachbuch
- DVGW W 112, W 121: Merkblätter
- DVWK (1990c): Fachbuch
- DIN 4046, 4049, 4920, 4922, 4925: Technische Richtlinien
- LFU Ba.-Wü (1993): Symp. Modellstandortprogramm

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Erstellung von Probennahmepunkten

Probennahme Wasser

C 1: Entnahme von zuflußgewichteten Pumpproben

Allgemeine Information

Ziel:

Identifizierung und Quantifizierung von Schadstoffen im Grundwasser.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten ohne Anfahrt schwanken im Mittel zw. DM 150 - DM 800 pro Probennahme, hängen jedoch sehr stark von den örtlichen Bedingungen ab (Einbautiefe).

Bewertung:

Das Probennahmeverfahren erlaubt den Vergleich mit den P-W-Werten der gemeinsamen VwV "Orientierungswerte für die Bearbeitung von Allasten und Schadensfällen" des Umwelt- und Sozialministeriums Baden-Württemberg.

Anwendung

Voraussetzungen:

Meßstelle vorhanden, die Einbau einer Unterwasser-Motorpumpe erlaubt.

Theorie:

Grundwasseruntersuchungen im Zusammenhang mit Altlastenerkundungen dienen u.a. dem Zweck, Beeinflussungen der Wasserqualität durch (Schad-) Stoffe zu erkennen und zu quantifizieren. Von entscheidendem Einfluß auf die Aussagekraft der Grundwasserprobe ist eine ordnungsgemäße Probennahme. Ziel der Probennahme muß daher die Gewinnung einer Grundwasserprobe sein, die in ihrer Beschaffenheit die Zusammensetzung des Grundwassers wiedergibt, wie sie am Ort der Entnahme ohne den störenden Einfluß der Meßstelle zu erwarten wäre.

In einer Literaturstudie im Rahmen des Grundwasserüberwachungsprogramms der LFU Ba.-Wü. (1993) sind bislang gemachte Praxiserfahrungen zusammengestellt. Hierzu zählen Einflüsse von Art des Probennahmegeräts (Tauch- oder Saugpumpe) und der Probennahmematerialien auf die Grundwasser-Beschaffenheitsparameter. Eine über die o.g. Literaturstudie hinausgehende Systematisierung der Einflüsse des Meßstellenausbaus wird in DVWK (1990c) behandelt.

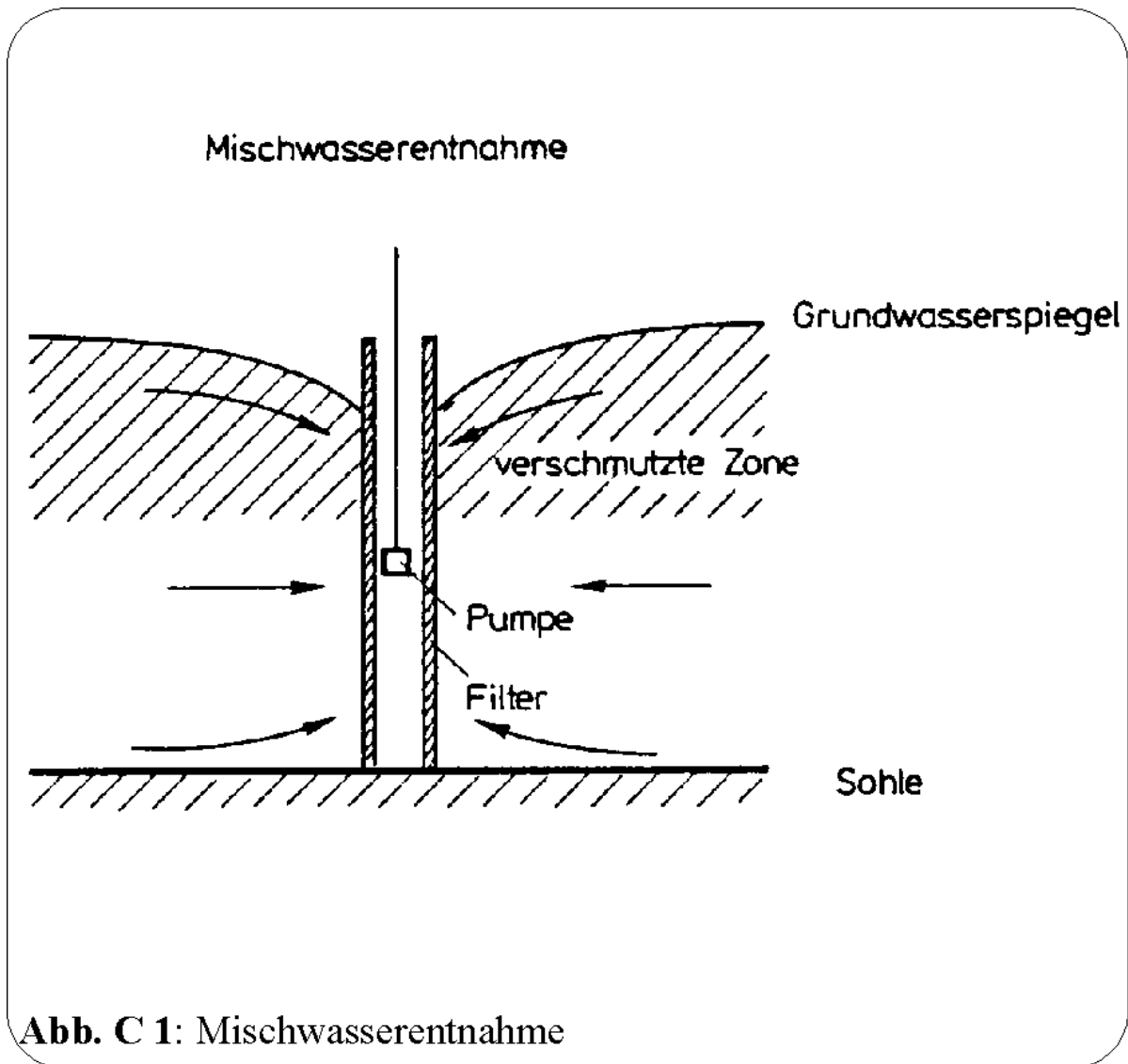


Abb. C1: Mischwasserentnahme

Praxis:

Die Entnahme von einer zuflußgewichteten Mischprobe ist von den individuellen hydraulischen und geologischen Gegebenheiten abhängig und kann gewonnen werden durch:

a) eine Pumpprobe,

bei der vor der Probennahme so lange Wasser gefördert wird, bis die kontinuierlich gemessenen Parameter elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert und Sauerstoffkonzentration konstant sind. Weiter darf die Probennahme in grober Näherung erst nach einer zwei- bis fünfmaligen Volumenerneuerung des Meßstelleninhalts (Rohrinhalt) erfolgen. Unter Einhaltung dieser Bedingungen kann man davon ausgehen, daß die Entnahme der zuflußgewichteten Mischprobe zu aussagekräftigen Resultaten führt.

b) einen Pumpversuch zur Probennahme,

bei dem aus einer Meßstelle Wasser über eine Zeitdauer t mit einer Entnahmerate Q entnommen wird. Nach Ende der Zeitdauer t läßt sich rechnerisch die erfaßte Abstrombreite a bestimmen, aus der Wasser der Meßstelle zuströmt. Die Vor-Ort-Parameter sollten hier ebenfalls beobachtet werden. Nach Ablauf der Pumpphase wird eine zuflußgewichtete Mischprobe entnommen, die für die Abstrombreite a kennzeichnend ist. Die Probennahme erfolgt in einer vom Untersuchungslabor je nach Parameterumfang vorgegebenen Anzahl von Probennahmegeräßen. Eine umfassende Dokumentation der Probennahme ist Grundlage zur Vermeidung von Fehlinterpretationen bei unplausiblen Analyseergebnissen.

Auswertung:

Wichtigster Bestandteil der Auswertung ist der Vergleich des Analysenbefundes mit den für die Fragestellung relevanten Grenz- und Richtwerten (z.B. Trinkwasserverordnung, VwV Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen). Daneben gibt ein Vergleich der Grundwasserbeschaffenheit im Zu- und Abstrom des Untersuchungsgebietes Aufschluß über eine mögliche Grundwasserbeeinträchtigung durch eine Altlast.

Die Untersuchungsergebnisse werden im allgemeinen in Form von Tabellen und Grafiken dargestellt.

Literatur:

- DVWK (1990c, 1994): Fachbuch
- BARCZEWSKI & MARSHALL (1990a): Forschungsbericht
- LFU Ba.-Wü. (1993): Literaturstudie
- UM Ba.-Wü (1989): Handbuch Hydrologie

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Probennahme Wasser

C 2: Entnahme von horizontalen Pumpproben

Allgemeine Information

Ziel:

Identifizierung und Quantifizierung von Schadstoffen im Grundwasser in Abhängigkeit von der Probennahmetiefe.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten ohne Anfahrt schwanken zw. DM 350 bis ca. DM 3000 pro Probennahme und hängen stark von den äußeren Bedingungen (Entnahmetiefe) und dem Verfahren ab.

Bewertung:

Im Verbund mit anderen Methoden (Tracertests, Flowmetereinsatz) liefert das, u.U. relativ aufwendig zu erstellende, vertikale Konzentrationsprofil ein wichtiges Hilfsmittel bei speziellen Fragestellungen im Rahmen von Altlastenerkundungen, -sicherungen, -sanierungen (Ermittlung des Ist-Zustandes (Schadstoffahne), Kontrolle des Soll-Zustandes (Sanierungsziel)).

Anwendung

Voraussetzungen:

Meßstelle vorhanden, die Einbau einer Unterwasser-Motorpumpe erlaubt; bohrlochgeophysikalische Informationen.

Theorie:

Die horizontalisierte Pumpprobe soll die tatsächlichen Verhältnisse am Ort und zum Zeitpunkt der Probennahme widerspiegeln. Diese Beprobung kommt bei vermuteten signifikanten Unterschieden in der vertikalen Verteilung der Kontamination zum Einsatz. Dies bedeutet, daß vor allem hydraulische Gesichtspunkte bei der Probennahme zu berücksichtigen sind.

Praxis:

Die Entwicklung eines geeigneten Probennahmekonzeptes erfordert demnach eine klare Vorstellung zur Hydrogeologie eines Standortes. Die tiefenorientierte Beprobung kann ohne besondere Einbauten in folgenden Grundwassermeßstellentypen stattfinden:

- a) Mehrfachmeßstelle, mehrere Rohre, durch Abdichtungen getrennt, gebündelt in einer Bohrung
- b) Mehrfachmeßstelle als separate Bohrungen unterschiedlicher Tiefe (Piezometernest)
- c) Mehrfachmeßstelle mit Sonderausbau für Mehrfachbeprobungssystem

Die Erschließungskosten für die Meßstellen Typ b, c sind sehr hoch, bei Typ a stellen die schwierig einzubauende Abdichtungen zwischen den Peilrohren oft eine hydraulische Schwachstelle dar. In Baden-Württemberg sind Einfachmeßstellen vom Typ wie er unter B 5 beschrieben wurde, am häufigsten vorzufinden.

Eine Bewertung der derzeit existierenden, z.T. neu entwickelten und mit wechselnden Vor- und Nachteilen behafteten Probenahmekonzepte geben LERNER & TEUTSCH (1995) anhand eines umfangreichen Kriterienkataloges. Für den Fall der Beprobung von Schadstoffen in Phase (z. B. Mineralöl) muß darauf geachtet werden, daß keine Verschleppungen auftreten. Die gängigsten Konzepte zur tiefenorientierten Beprobung sind:

- Pumpen-Systeme: Der Anstrom zur Meßstelle wird durch zwei Pumpen in zwei, durch eine Wasserscheide getrennte, Komponenten aufgeteilt (Abb. C 2). Die Beprobung erfolgt an der Trennstromlinie, für die ein horizontaler Anstrom angenommen wird.

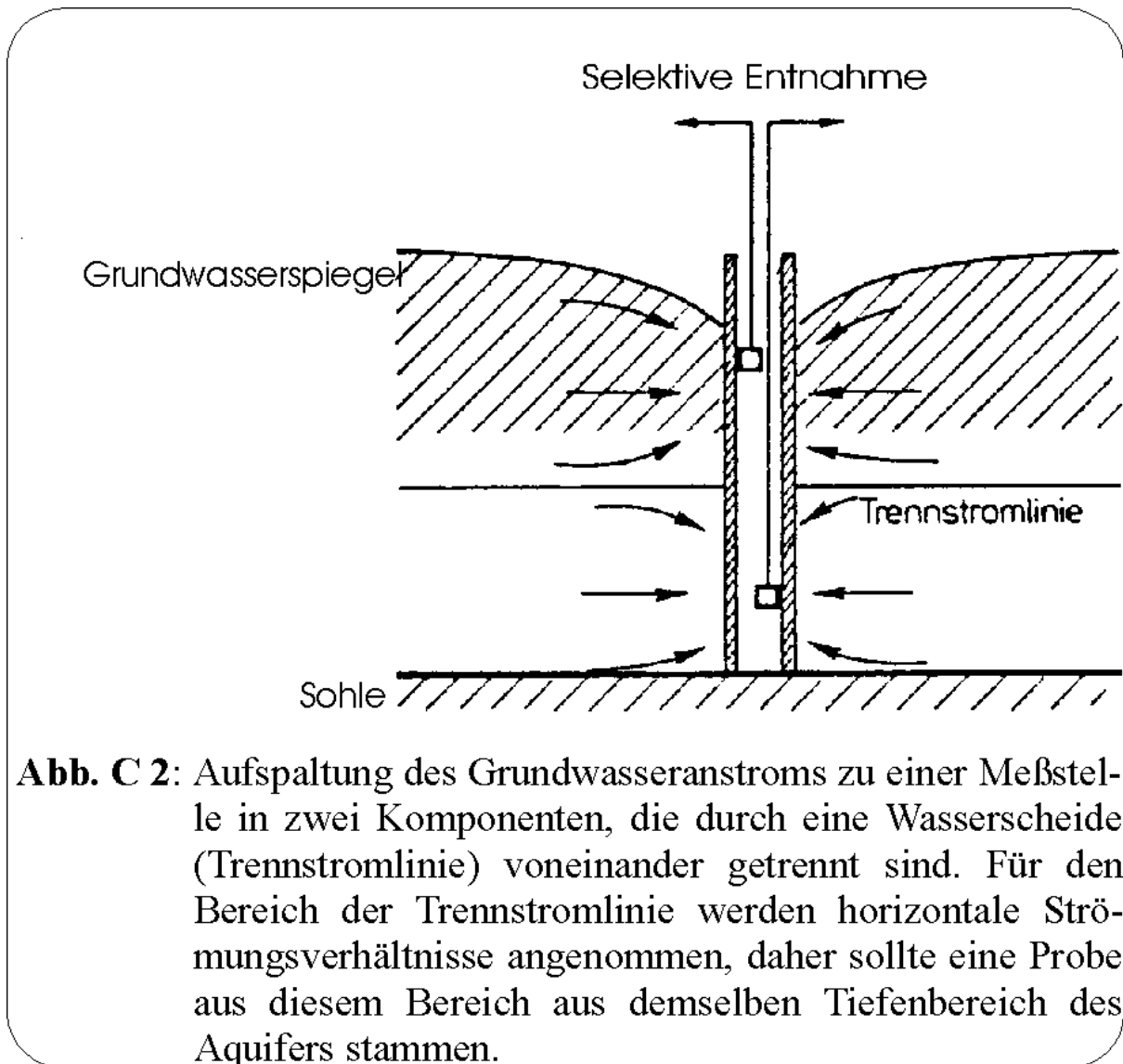


Abb. C 2: Aufspaltung des Grundwasseranstroms zu einer Meßstelle in zwei Komponenten, die durch eine Wasserscheide (Trennstromlinie) voneinander getrennt sind. Für den Bereich der Trennstromlinie werden horizontale Strömungsverhältnisse angenommen, daher sollte eine Probe aus diesem Bereich aus demselben Tiefenbereich des Aquifers stammen.

Abb. C2: Aufspaltung des Grundwasseranstroms zu einer Meßstelle in zwei Komponenten

- Das Absenken von Schöpfern ("bailer") oder Tauchpumpen ist zur exakten horizontalen Beprobung ungeeignet. Der Einsatz zerstört vorhandene vertikale Konzentrationsgradienten und berücksichtigt die vertikale Meßstellenhydraulik nicht.
- Packersysteme: Doppelpackersysteme ohne Schutzbeprobung sind aufgrund möglicher vertikaler Umläufigkeiten nicht zur repräsentativen Probennahme in vollverfilterten Meßstellen geeignet (BARCZEWSKI & MARSHALL, 1990a). Doppel- oder Multipackersysteme mit Schutzbeprobung durch unabhängig voneinander regelbaren Tauchpumpen erzielen weitaus bessere Ergebnisse, das vertikale kf-Profil muß zur Festlegung der einzelnen Förderraten bekannt sein (s. E 10, H 1).
- Multi-port sock sampler (In-Line-Packer System): Die gesamte Meßstelle wird von innen durch einen Gummischlauch mit variablen Probennahmeöffnungen (Multi-Levelbeprobung) abgepackert (passives System). Zur Vermeidung vertikaler Umläufigkeiten kann die Beprobung der Öffnungen simultan und automatisiert erfolgen (TEUTSCH & PTAK, 1989).

Auswertung:

Erstellung eines vertikalen Konzentrationsprofils der Grundwassermeßstelle oder des Bohrlochs.

Literatur:

- BARCZEWSKI & MARSHALL (1990a): Forschungsbericht
- DVWK (1982): Merkblatt
- LERNER & TEUTSCH (1995): Forschungsbericht
- TEUTSCH & PTAK (1989): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Probennahme Wasser

Hydrologische Methoden

D 1: Stichtagsmessung des Wasserstandes

Allgemeine Information

Ziel:

Ermittlung des Grundwasserstands, der Grundwasseroberfläche, der Grundwasserfließrichtung sowie des Grundwassergefälles in einem Gebiet mit mehreren Meßstellen.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten und der Zeitaufwand für die Auswertung hängen direkt von der Meßstellenanzahl und dem Meßverfahren (Handmessung, Datensammler) ab.

Bewertung:

Die Stichtagsmessung des Wasserstandes und deren Auswertung ist in kleinen Meßnetzen relativ preiswert und stellt unerlässliches Arbeitsmaterial für zahlreiche hydrogeologische Fragestellungen dar.

Anwendung

Voraussetzungen:

Meßstellen müssen vorhanden, durch eine Funktionskontrolle überprüft, lage- und höhenmäßig eingemessen, ihrem Ausbau nach bekannt und für das Meßverfahren gangbar sein; Kenntnis über den geologischen Aufbau des Gebietes (Grundwasserstockwerke) ist unerlässlich.

Theorie:

Die Form der Grundwasseroberfläche und deren Höhenlage spiegeln den momentanen Zustand der geohydraulischen Dynamik des betrachteten Gebietes wieder. In den Grundwassermeßstellen stellt sich der Grundwasserspiegel entsprechend dem Niveau der Grundwasserdruckfläche ein (HÖLTING, 1992). Die Standrohrspiegelhöhe bezieht man auf ein einheitliches Bezugssystem (meist in m ü. NN). Grundwassergleichen (= GW-Isohypsen) sind als Verbindungslinien gleicher Höhe einer Grundwasserdruckfläche definiert.

Praxis:

Das gebräuchlichste Meßgerät zur Messung des Wasserstandes ist das Lichtlot. Das Gerät besteht aus einem Lot mit eingebauter Elektrode, die über ein skaliertes Kabel eine Signal-

lampe schaltet. Der Abstich wird unmittelbar in Höhe des Meßpunktes abgelesen, dadurch können Kontaminationen, insbesondere aufschwimmende Phasen, nicht verschleppt werden.

Die Messung des Grundwasserspiegels sollte während Trockenwetterperioden durchgeführt werden, stark instationäre Phasen mit hoher Grundwasserneubildungsrate (Niederschlagsperioden) sind als Meßzeitpunkt ungeeignet, evtl. aber als Sondermessung interessant. In Grundwassermeßnetzen kann die Aufzeichnung der Grundwasserstände mittels automatischer Datensammler erfolgen. Eine Übersicht und kritische Wertung der Gerätetypen ist in DVWK (1994) dargestellt.

Auswertung:

Die Ergebnisse einer Stichtagsmessung werden kartographisch als Grundwassergleichenplan dargestellt, aus welchem sich die Grundwassermorphologie, das hydraulische Gefälle und die Strömungsrichtung ableiten läßt (Abb. D 1).

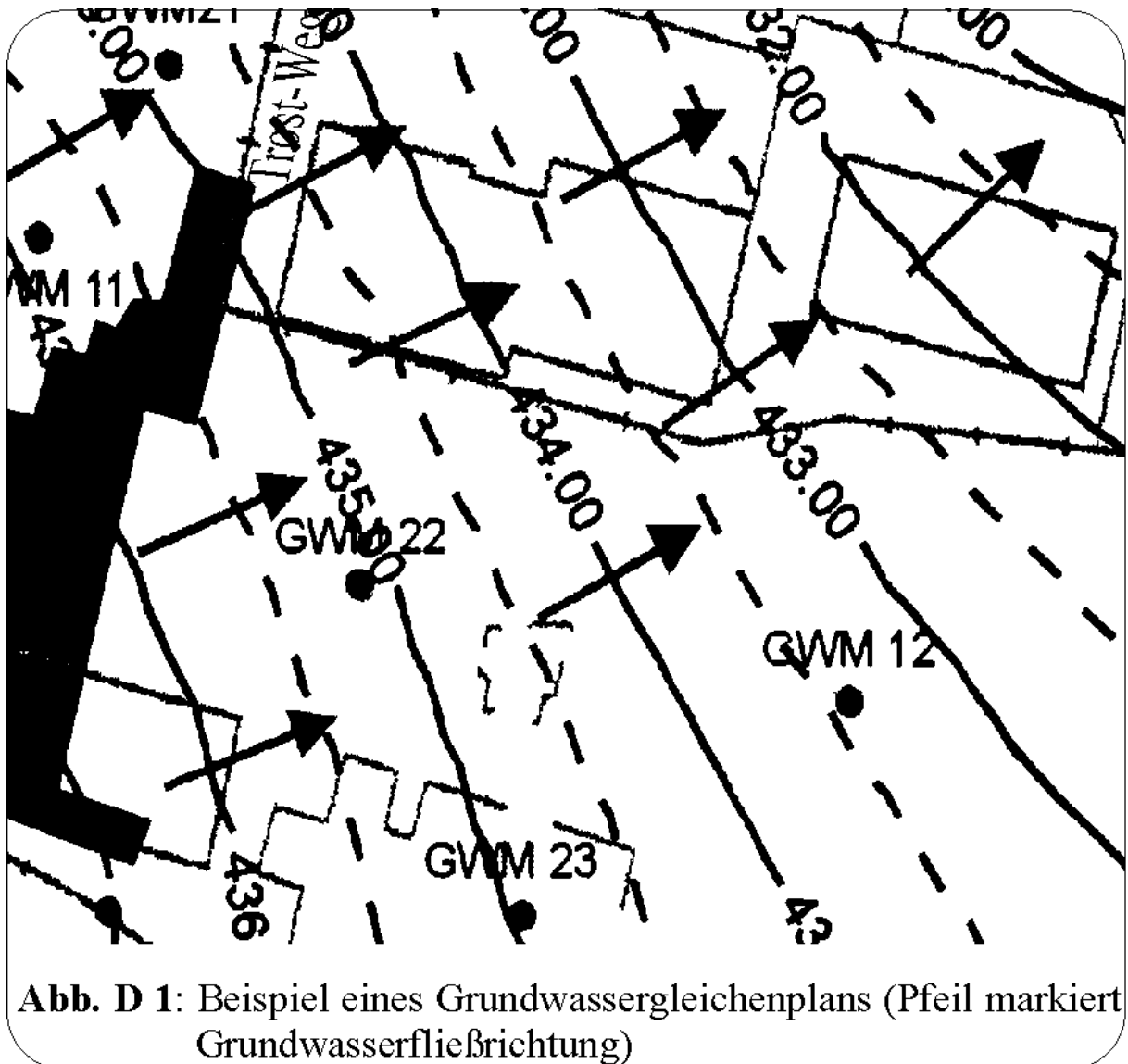


Abb. D1: Beispiel eines Grundwassergleichenplans

Der zeitliche Verlauf der Grundwasserstände wird in Form von Grundwasserstand - Differenzplänen dargestellt. Die lotrechten Höhenunterschiede zwischen Punkten an der Erdoberfläche und der Grundwasseroberfläche des ersten Grundwasserstockwerks können als Grundwasserflurabstandskarten gezeichnet werden.

Die Durchführung mehrerer Stichtagsmessungen des Wasserstandes führt zu Grundwasserganglinien, die durch ihren Verlauf und ihre Variationsbreite das hydrologische Verhalten des Grundwasserkörpers charakterisieren. Der Höhenvergleich der Grundwasserstände mit den Pegelständen eines sich in der Nähe befindenden Oberflächengewässers über einen definierten Zeitraum gibt Auskunft darüber, ob das Grundwasser einem Vorfluter zuströmt (effluente Abflußverhältnisse), alternativ zuströmt, oder das Fließgewässer in das Grundwasser infiltriert (influente Abflußverhältnisse). Das jeweilige Verhalten ist bei der Betrachtung des Schadstofftransportes von großer Wichtigkeit.

Bei ausreichender Meßstellendichte erlaubt die Stichtagsmessung eines relativ homogenen Aquifers mit stationären Strömungsverhältnissen die Strömungsnetzanalyse (s. LFU Ba.-Wü., 1991) eines Grundwassergleichenplans.

Literatur:

- DIN 4049 (1994): Technische Richtlinie
- DVWK (1994): Fachbuch
- LAWA (1984): Richtlinie
- LFU Ba.-Wü. (1991): Handbuch
- MATTHES & UBELL (1983): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydrologische Methoden

D 2: Abflußmessung

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung des Abflusses von Quellen und Vorflutern mit Grundwasseranteilen zur Aufstellung einer Wasserbilanz.

Kosten/Aufwand:

Bei direkten Messungen sind nur die Personal- und Fahrtkosten zu veranschlagen. Für eine Meßstrecke mit Überfallbreiten zw. 1 - 5 m, fertig eingebaut, entstehen Kosten zwischen DM 10.000 bis DM 80.000.

Bewertung:

Abflußmessungen sind ein vielseitig einsetzbares hydrologisches Verfahren (z.B. Bestimmung der Grundwasserneubildung, Uferfiltration). Als eine von mehreren Eingangsgrößen in Wasserhaushaltsbetrachtungen (Wasserbilanz) oder GW-Modellierungen benötigen Abflußmessungen den Datensatz eines hydrologischen Jahres und sind daher als ein relativ zeitaufwendiges Verfahren einzustufen.

Anwendung

Voraussetzungen:

Hydraulisches Gefälle zwischen Grundwasserkörper und Vorfluter (effluent, influent), Größe des unterirdischen Einzugsgebiet bekannt und einem oberirdischen Entwässerungsnetz zuordenbar.

Theorie:

Als Abfluß wird nach DIN 4049 allgemein sich unter dem Einfluß der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche bewegendes Wasser bezeichnet. Der Gesamtabfluß eines definierten Gebiets setzt sich zusammen aus (Abb. D 2):

- oberirdischer Abfluß
- Zwischenabfluß
- unterirdischer Abfluß

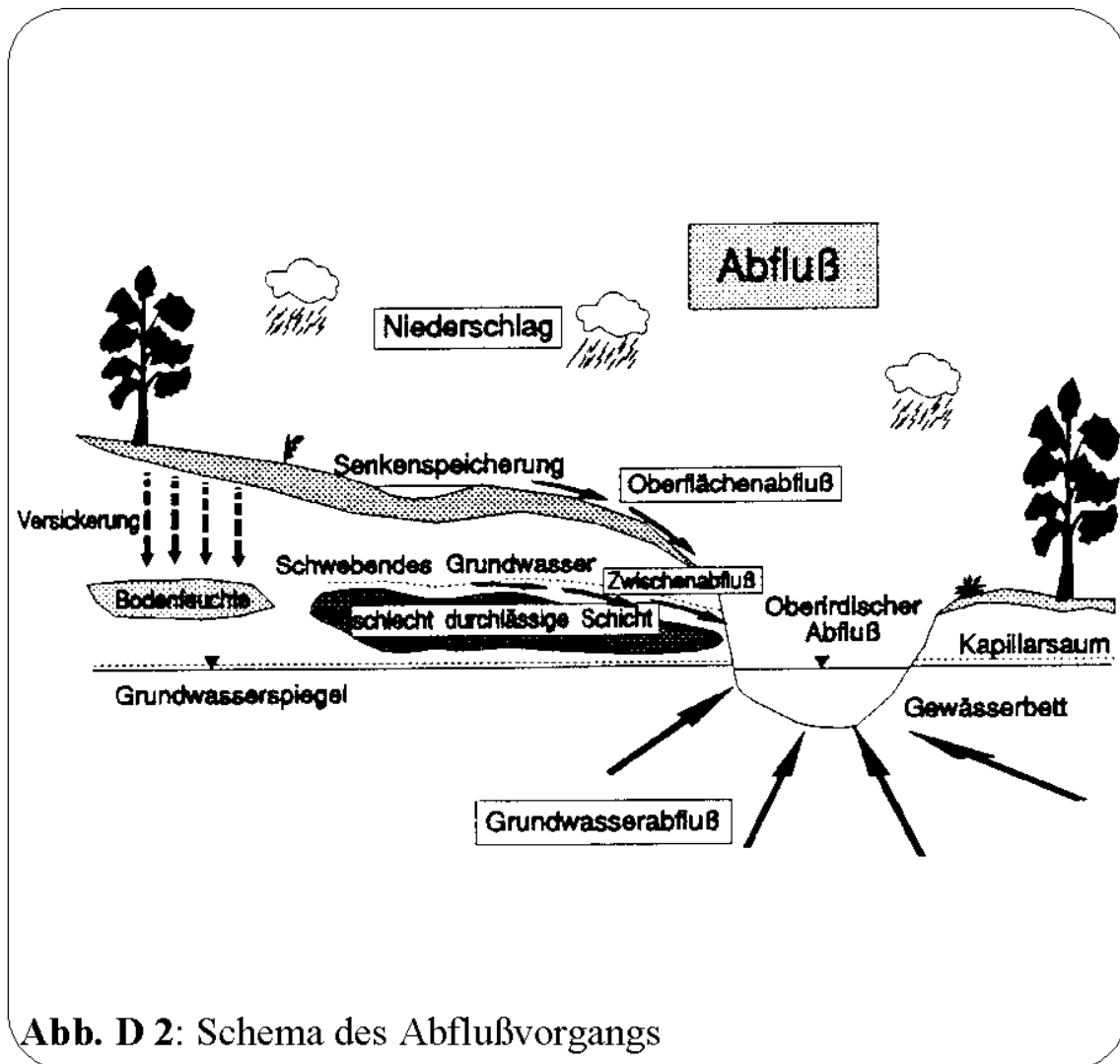


Abb. D 2: Schema des Abfluvvorgangs

Abb. D2: Schema des Abfluvvorgangs

Die unterirdische Abfluvhöhe (Grundwasseranteil) am oberirdischen Gesamtabfluv hängt insbesondere von den geologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet ab. Quellen sind der Ort eines räumlich eng begrenzten Grundwasseraustritts, Vorfluter sind natürliche, aber auch künstliche, oberirdische Gewässer, die zufließendem Wasser aufgrund des Vorhandenseins eines Gefälles die Möglichkeit zum Abfließen bieten.

Praxis:

Bei Abfluvmessungen wird zwischen direkten und indirekten unterschieden. Der unterirdische (Grundwasser-)Abfluv kann als direkte Messung nur durch volumetrische Messung der Quellschüttung in Auffanggefäßen bestimmt werden. Die Schüttung von Quellen aus einem abgrenzbaren Einzugsgebiet kann jedoch erst dann quantitative Informationen über den Grundwasserleiter liefern, wenn die Quellmeßstelle sachgemäß hergestellt sowie der vorliegende Quelltyp richtig erfaßt wurde und die Messungen zeitlich eng genug und über einen längeren Zeitraum erfolgen.

Indirekte Messungen basieren auf der Berechnung der Fließgeschwindigkeit und des Abflußquerschnittes. Bei hydrogeologischen Kartierungen hat sich der Woltmannmeßflügel bewährt (Umdrehungszahl des Propellerflügels ist proportional zur Fließgeschwindigkeit).

Bei anderen Methoden werden durch entsprechenden Gewässerausbau die Strömungsverhältnisse annähernd konstant gehalten. Der Abfluß kann dann aus der Änderung des Abflußquerschnittes (Höhe des Wasserstandes) berechnet werden (Meßwehre, Venturi-Gerinne). Dieses Meßprinzip wird auch bei Abflußmessungen durch Gewässerpegel (Eichkurve notwendig) angewendet. Die Abflußdaten von oberirdischen Gewässern können, falls vorhanden, dem Gewässerkundlichen Jahrbuch entnommen werden.

Auswertung:

Die Abflußdaten können als Häufigkeitslinie, Wasserstandsdauerlinie oder Abflußganglinie dargestellt werden.

Literatur:

- DIN 4049, 19559: Technisches Regelwerk
- HÖLTING (1992): Lehrbuch
- FH-DGG (1977): Forschungsbericht
- KILLE (1970): Forschungsbericht
- NATERMANN (1951): Forschungsbericht
- SCHRÖDER (1955): Forschungsbericht
- VILLINGER (1981): Forschungsbericht
- WUNDT (1953): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydrologische Methoden

Hydraulische Methoden

E 1: Pumpversuche

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der wasserleitenden und wasserspeichernden Eigenschaften eines Aquifers und der angrenzenden Gesteine in situ (Transmissivität, Speicherkoeffizient), Ermittlung der Grundwasserbeschaffenheit durch begleitende Messungen und Probennahmen (Erkennen einer Schadstofffracht).

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für einen Pumpversuch hängen von der Anzahl der Beobachtungsmeßstellen, der Probennahme und Analytik, der Versuchsdauer, Fördereinrichtung und Einbautiefe ab.

Für einen in gut zugänglichem Gebiet innerhalb eines Tages durchführbaren Kurzpumpversuch sind ca. DM 3000 - DM 4000 zu veranschlagen. Für einen Langzeitpumpversuch über zwei Wochen belaufen sich die Kosten im Mittel auf ca. DM 20.000 - DM 25.000.

Bewertung:

Nach der Durchführung von Pumpversuchen kann über die Bestimmung der Erfassungsbreite entschieden werden, ob der erzielte Kenntnisstand der Grundwassererkundung entsprechend der Erkundungsstufe ausreichend ist.

Langzeitpumpversuche sind eine gute Methode zur Gewinnung von lokal gültigen hydrogeologischen Parametern des Grundwasserleiters und der Grundwasserqualität.

Kurzpumpversuche liefern rasch und kostengünstig eine qualitative Einschätzung der Aquiferparameter.

Anwendung

Vorraussetzung:

Ein Pumpversuch stellt nach §3 Abs. 1 Ziff. 6 WHG eine Grundwasserbenutzung dar und ist daher erlaubnispflichtig. Die Erlaubnis ist bei der lokal zuständigen unteren Wasserbehörde zu beantragen.

Theorie:

Das Feldexperiment beinhaltet die Entnahme von Grundwasser aus einem Brunnen (Abb. E 1). Aus den Änderungen der Wasserstände in dem Brunnen und in den Meßstellen sowie der Beschaffenheit und Temperatur des geförderten Wassers können geohydraulische und betriebstechnische Informationen gewonnen werden. Die Pumpversuche können entsprechend ihrer Zielsetzung untergliedert werden in:

- **Langzeitpumpversuch (Aquifertest):** Dieser Test dient der Ermittlung von Aquifer- und Brunneneigenschaften, der Identifikation des Strömungssystems sowie der Bestimmung der Entnahmebreite und des Absenkungstrichters. Der Versuch wird einstufig mit konstanter Entnahmerate über mehrere Tage oder auch Wochen gefahren. Die Wasserstände sollten dabei nicht nur im Förderbrunnen selbst, sondern auch in benachbarten Beobachtungsmeßstellen erfaßt werden.
- **Kurzpumpversuch (Pumptest):** Dieser Test dient ebenfalls der Ermittlung hydraulischer Kenndaten des Aquifers. Aufgrund der kurzen Pumpphase (mindestens 4 h) sollten mit diesen Werten lediglich qualitative Aussagen über die lokalen Aquifereigenschaften getroffen werden, quantitative Aussagen sind kritisch zu sehen.
- **Stufenpumpversuche (Brunnentests):** Bei hydrogeologischen Untersuchungen zur Wasserversorgung werden häufig Stufenpumpversuche (Brunnentests) durchgeführt. Dieser Test dient vor allem der Erstellung einer Leistungscharakteristik eines Brunnens und der Ermittlung von Brunnenverlusten.
- **Gütepumpversuche:** Diese Versuche dienen der meßstellenspezifischen Festlegung von Abpumpkriterien und haben sich insbesondere bei langfristigen Überwachungsprogrammen mit kontinuierlicher Beprobung bewährt.
- **Pumpversuche zur Probenahme:** Der Abpumpvorgang dient hier lediglich der Entnahme von Grundwasserproben (s. C 1).

Die aufgeführten Ziele können z.T. in einem Pumpversuchstyp kombiniert werden, z.B. Kurzpumpversuch zur Probennahme.

Praxis:

Die Grundsätze zur Planung und Organisation der wirtschaftlichen Durchführung von Pumpversuchen wurden in einem Arbeitsblatt "Pumpversuche in Porengrundwasserleitern" (MELU Ba.-Wü., 1976) festgelegt. Vor der Durchführung eines Pumpversuchs ist ein Versuchsplan aufzustellen. Dieser beinhaltet u.a.:

- Festlegung der Meßeinrichtungen (Anzahl der Meßstellen, Ausbautiefe, Filterstrecke, Bohrlochdurchmesser)
- Meßverfahren, Meßintervalle
- Begleitmessungen (Hydrochemie, Temperatur, usw.)
- Abschätzung der Förderrate, Entnahmebreite

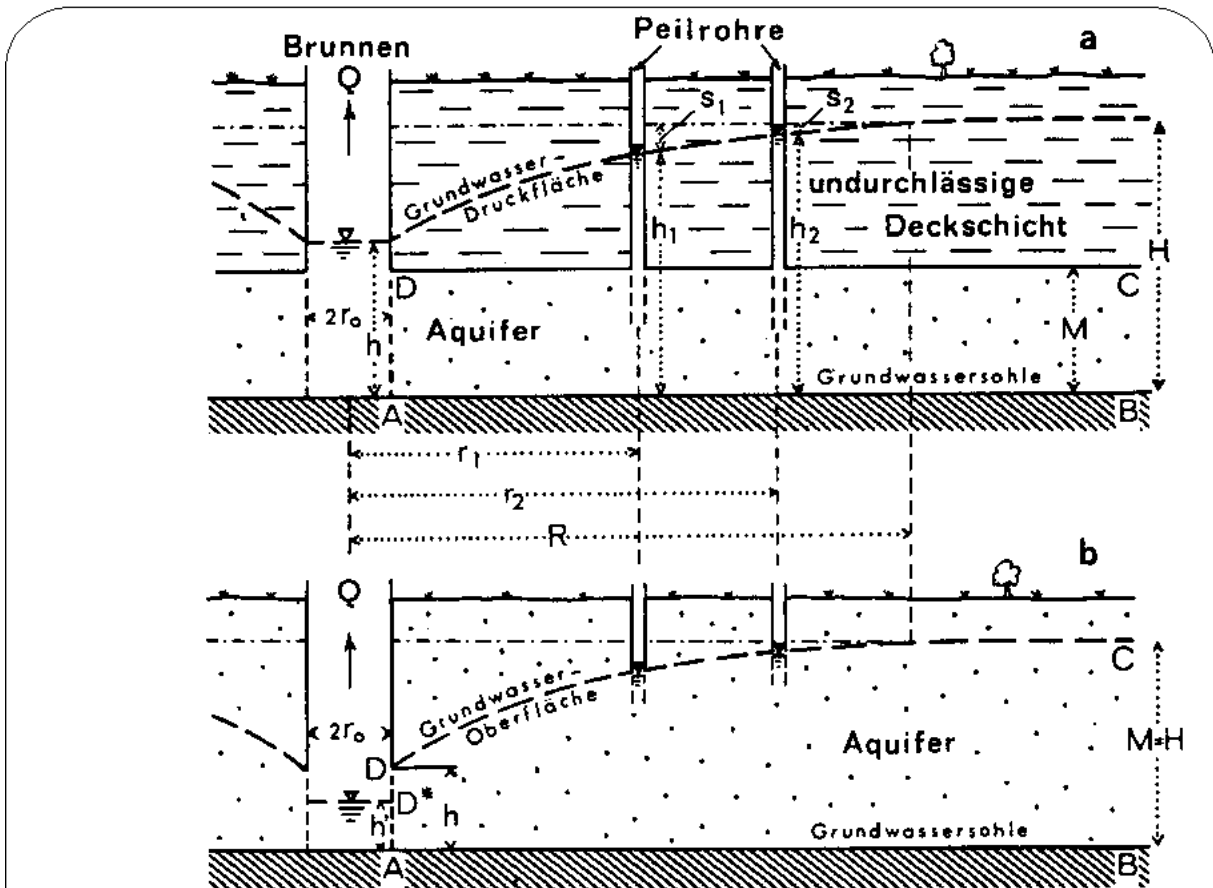


Abb. E 1: Die Parameter der Pumpversuche in gespanntem (a) und ungespanntem (b) Grundwasser. Q ist die Entnahmemenge aus einem Brunnen in einem Aquifer mit der Mächtigkeit M . Die Absenkungsbeträge s werden in Beobachtungsmeßstellen im Abstand r gemessen.

Abb. E1: Parameter der Pumpversuche in gespanntem und ungespanntem Grundwasser

Bei Pumpversuchen im Festgestein sind bereits bei der Planung verschiedene Besonderheiten zu berücksichtigen (GLA Ba.-Wü., 1994). Die Unterschiede zwischen Pumpversuchen in Fest-/ Kluft- und Porengrundwasserleitern sind in STRAYLE (1983) tabellarisch zusammengestellt.

Nach Installation von Fördereinrichtung und Registriereinheiten ist während der Durchführung eines Pumpversuchs die Förderrate unbedingt konstant zu halten.

Die Erfassung des Wasserstandes im Förderbrunnen und in den beobachteten Meßstellen (geforderte Genauigkeit: 0,5cm) kann durch Handmessungen nach definierten Intervallen oder durch kontinuierlich registrierende Meßeinrichtungen erfolgen. Eine Übersicht über automatische Datensammler ist in DVWK (1994) gegeben, die Steuerung der Datensammler erfolgt über einen mobilen Feldcomputer, dieser ermöglicht zugleich die graphische Kontrolle des Absenkungsverlaufs. Bei manueller Datenerfassung ist das Protokoll vor Ort auf entsprechenden Formblättern so zu führen, daß ein Übertrag der Daten auf EDV-Systeme problemlos zu bewerkstelligen ist.

Bei einem Pumpversuch können Phasen der Absenkung und Wiederanstiegsperioden unterschieden werden. Die Aufzeichnung des Wiederanstiegs ist für die geohydraulische Auswertung besonders wichtig, da dieser nicht von Leistungsschwankungen der Pumpe und brunnen-spezifischen Einflüssen überlagert ist. Nach erfolgter Identifikation des Modells erfolgt die Bestimmung der hydraulischen Parameter durch:

- a) Einfache graphische Verfahren (Ausgleichsgerade)
- b) Typkurvendeckungsverfahren
- c) EDV-gestützte Verfahren
- d) Numerische Verfahren

Zur Wahl eines Auswerteverfahrens wird auf die entsprechenden Lehrbücher und Fachliteratur verwiesen. Ein Langzeitpumpversuch sollte im allgemeinen mit verschiedenen Methoden ausgewertet werden. Allerdings müssen die gewonnenen Ergebnisse abschließend bewertet werden, um einen repräsentativen Wert für die Transmissivität zu erhalten. Generell sind die Ergebnisse nur als integrale Werte für den jeweiligen Entnahmbereich (Absenkungsbereich) zu verstehen.

Die Auswertung von Kurzpumpversuchen basiert auf Näherungsverfahren, welchen zusätzliche, vereinfachende Randbedingungen zugrundeliegen. Bei Kurzpumpversuchen ist jedoch zu beachten, daß aufgrund der geringen Pumpzeiten und Brunnenverluste, die Ergebnisse keine für den Aquifer repräsentativen Charakter besitzen. Im Vergleich zu Langzeitpumpversuchen können die ermittelten Transmissivitäten systematisch abweichen (KOZIOROWSKI, 1985).

Literatur:

- DVWK (1994): Fachbuch
- DAWSON & ISTOCK (1990): Lehrbuch
- GLA Ba.-Wü (1994): Informationen
- KOZIEROWSKI (1985): Forschungsbericht
- KRUSEMANN & DE RIDDER (1991): Lehrbuch
- LANGGUTH & VOIGT (1980): Lehrbuch
- MELU Ba.-Wü. (1976): Arbeitsblatt
- STRAYLE (1983): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 2: Slug-Test

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der Transmissivität und des Speicherkoeffizienten von Aquiferen mit mittleren bis kleinen Transmissivitäten.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für den Versuch hängen von der Versuchstechnik, der Versuchsdauer, Einbautiefe und der Teststreckenanzahl ab und liegen üblicherweise zwischen DM 2000 bis DM 5000 je Teststrecke.

Bewertung:

Der Slug-Test eignet sich zur wirtschaftlichen Bestimmung der Transmissivität von Aquiferen mit mittleren bis kleinen Transmissivitäten. Unter Einsatz von Packern ist die Aufnahme eines vertikalen kf-Profiles möglich. Die Ergebnisse gelten nur für die unmittelbare Umgebung des Bohrlochs.

Anwendung

Voraussetzungen:

Wasserrechtliche Erlaubnis nach WHG liegt vor, Bohrloch oder Meßstelle für evtl. eingesetzte Testgarnitur oder Verdrängungskörper gangbar.

Theorie:

Slug-Tests dienen der Bestimmung der Transmissivität eines Aquifers ($T = 10^{-3}$ bis 10^{-7} m²/s). Sie können jedoch nicht dazu dienen, den hydrogeologischen Aufbau eines Aquifers zu diagnostizieren (STOBER, 1986). Da stark unregelmäßige Bohrlochdurchmesser vertikale Umläufigkeiten erzeugen können, empfiehlt es sich, das Bohrloch vor dem Versuch mit einem Kaliber-Log zu befahren (s. H 5).

Das Prinzip eines Slug-Tests beruht darauf, den in einem Bohrlochabschnitt herrschenden Druck schlagartig zu verändern und in der darauf einsetzenden Fließphase die Wiedereinstellung des Ruhewasserspiegels als Reaktion des Wasserspiegels in einem Testrohr zu messen (HEKEL, 1994). Ob der Druck abgesenkt oder erhöht wird, spielt prinzipiell keine Rolle. Der zeitliche Verlauf der Druckaufbau- bzw. der Druckabbauphase ist ein Maß für die Transmissivität in der Umgebung des Bohrlochs.

Praxis:

Eine beabsichtigte Probennahme zur Überprüfung der Grundwasserqualität sollte aufgrund der möglichen Infiltration des anstehenden Gesteins durch das eingebrachte Fremdwasser bereits vor Versuchsbeginn durchgeführt worden sein. Der Slug-Test kann im Bohrloch, aber auch in der ausgebauten Grundwassermeßstelle durchgeführt werden. Mit dieser Methode werden in aller Regel unter Einsatz von Packern Bohrlochabschnitte zwischen 5-10 m untersucht (Abb. E 2).

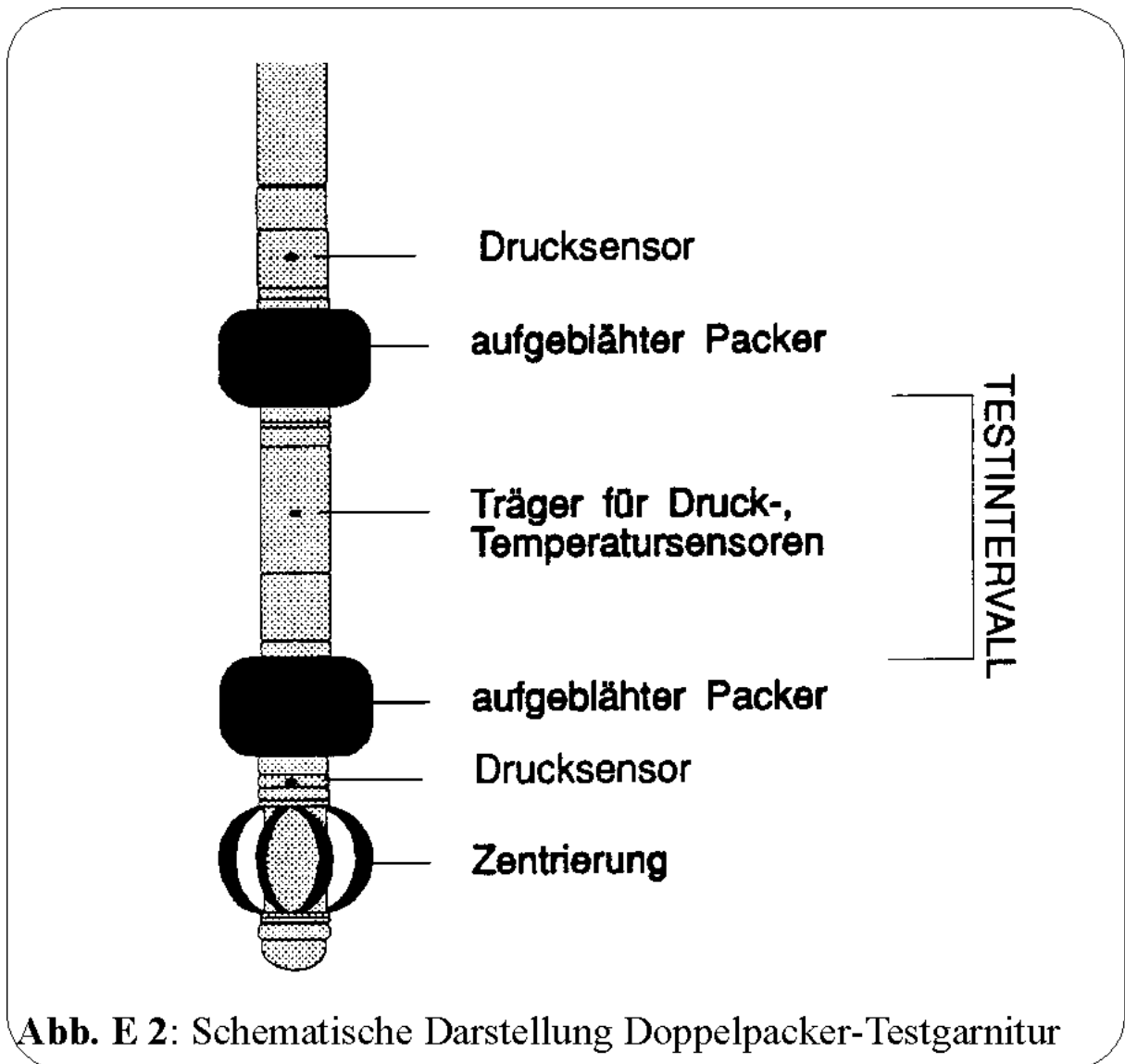


Abb. E2: Schematische Darstellung Doppelpacker-Testgarnitur

Im verrohrten Bohrloch erstreckt sich die Betrachtung auf die Filterstrecke. Es lassen sich unterscheiden:

- Absenkttests:
 - Schlagartige, definierte Wasserentnahme aus dem Testrohr
 - Ziehen eines Verdrängungskörpers im Testrohr
 - Absenkung des Wasserspiegels in der Packertestgarnitur unter das Ruhepotential des Testintervalls, nachfolgendes Öffnen eines Testventils
- Auffülltests:
 - Schlagartige, definierte Wasserzugabe in das Testrohr
 - Eintauchen eines Verdrängungskörpers in das Testrohr
 - Erhöhung des Wasserspiegels in der Packertestgarnitur über das Ruhepotential des Testintervalls, nachfolgendes Öffnen eines Testventils

In der Phase des Druckausgleichs (ideal > 90%) wird die Entwicklung des Wasserspiegels als Funktion über die Zeit kontinuierlich aufgezeichnet.

Auswertung:

Eine Übersicht über die Standardauswerteverfahren ist in HEKEL (1994) gegeben.

Die Auswertung nach dem Typkurvenverfahren von RAMEY et al. (1975) (Skineffekt wird berücksichtigt), COOPER (1967) und PAPADOPULOS (1973) gilt für gespannte Aquifere unter instationären Bedingungen. Da die Typkurvenvorlagen einander sehr ähnlich sind, ist die Anpassung der Datenkurven häufig mit großen Schwierigkeiten verbunden. Ebenso unsicher ist daher die Bestimmung der Speicherkoeffizienten und der Skinfaktoren (HEKEL, 1994).

Die Geradlinienverfahren nach HVORSLEV (1951) oder THOMPSON (1987) haben den Vorteil, daß bereits wenige Prozent der Druckerholung ausgewertet werden können, während die Typkurvenverfahren 60-70% der Druckerholung benötigen, was eine längere Versuchsdauer erfordert.

Literatur:

- COOPER et.al. (1967): Forschungsbericht
- FREEZE & CHERRY (1979): Forschungsbericht
- HEKEL (1994): Dissertation
- HVORSLEV, (1951): Forschungsbericht
- PAPDOPULOS et al. (1973): Forschungsbericht
- RAMEY et al. (1975): Forschungsbericht
- STOBER (1986): Dissertation
- THOMPSON (1987): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 3: Pulse-Test

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der Durchlässigkeit von Geringleitern, des Skinfaktors sowie des Bohrlochkapazitätskoeffizienten des Bohrlochs.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für den Versuch hängen von der Versuchstechnik, der Versuchsdauer, der Einbautiefe und der Teststreckenanzahl ab und liegen meist zwischen DM 2000 und DM 5000 je Teststrecke.

Bewertung:

Der Pulse-Test kann nur in niedrig-permeablen Formationen angewendet werden und ist für die Durchlässigkeitsbestimmung einzelner Klüfte geeignet. Als Vorteil gegenüber dem Slug-Test sind die besonders in niedrigpermeablen Formationen auftretenden Versuchszeiten von nur wenigen Stunden zu nennen.

Anwendung

Voraussetzungen:

Wasserrechtliche Erlaubnis nach WHG liegt vor, Bohrloch für Testgarnitur gangbar.

Theorie:

Der Pulse-Test ist eine Weiterentwicklung des von COOPER et al. (1967) vorgeschlagenen Slug-Tests (s. E 2) und unterscheidet sich vom herkömmlichen Slug-Test durch die impulsartige Druckänderung (BREDEHOEFT & PAPADOPULOS, 1980). Da stark unregelmäßige Bohrlochdurchmesser vertikale Umläufigkeiten erzeugen können, empfiehlt es sich, das Bohrloch vor dem Versuch mit einem Kaliber-Log zu befahren (s. H 5).

In einem durch Doppelpacker abgedichteten Bohrlochintervall wird durch:

a) einen kurzfristigen Druckimpuls dem Untersuchungsabschnitt über das Gestänge eine bestimmte Menge Wasser zugeführt

= Pulse-injection Test (PiT)

- b) Ausblasen bzw. Pumpen der Flüssigkeitsspiegel in der Testgarnitur kurzfristig abgesenkt
= Pulse-withdrawal Test (PwT)

Der zeitliche Verlauf der Druckabbau- bzw. Druckaufbauphase (Abb. E 3) ist ein Maß für die Gebirgsdurchlässigkeit in unmittelbarer Umgebung des Bohrlochs, des Bohrlochkapazitätskoeffizienten und des Skinfaktors.

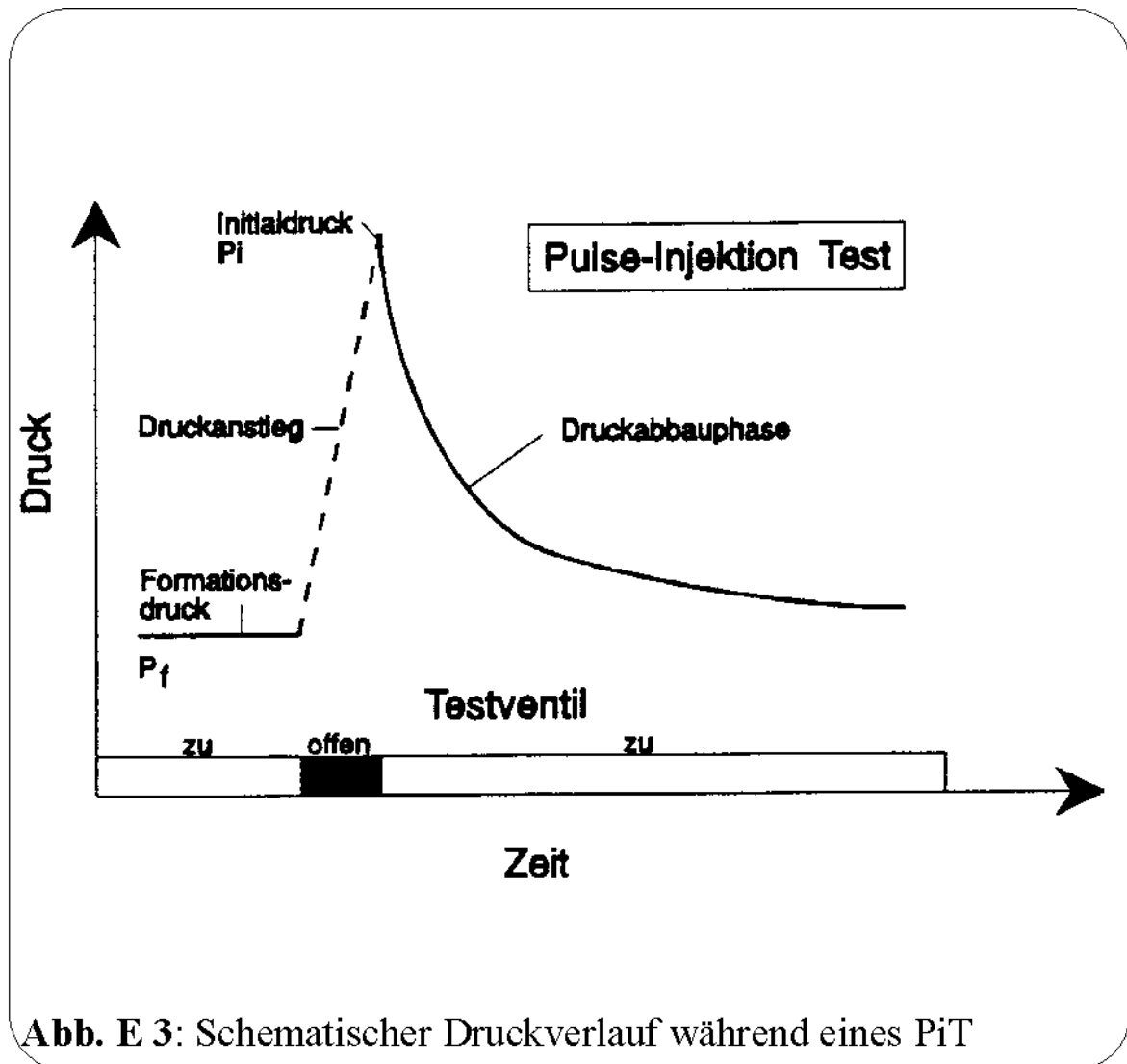


Abb. E3: Schematischer Druckverlauf während eines PiT

Praxis:

Die einzelnen Versuchsstadien lassen sich wie folgt schematisieren:

- Nach Einbau der ventilgesteuerten Testgarnitur und der Druckmeßsonden wird das Bohrlochintervall durch Packer abgeschlossen
- Schließen des Ventils im Testintervall
- PiT: Injektion von Wasser in die Testgarnitur, anschließend durch kurzes Öffnen des Ventils einen Überdruck im Testintervall erzeugen
- PwT: bei geschlossenem Ventil Wasserspiegel im Testintervall absenken, anschließend durch kurzes Öffnen des Ventils einen Unterdruck im Testintervall erzeugen
- In der Phase des Druckausgleichs bzw. Druckaufbaus wird der Druck über die Zeit kontinuierlich aufgezeichnet

Die Druckerholung verläuft sehr viel rascher als beim konventionellen Slug-Test, da keine großen Wassermassen in der Testgarnitur verwendet werden müssen.

Auswertung:

Für die Auswertung von Pulse-Tests werden dieselben Verfahren eingesetzt, wie zur Auswertung von Slug-Tests. Um eine sinnvolle Auswertung zu gewährleisten werden folgende Ansprüche an die technische Versuchsdurchführung gestellt:

- Ruhedruck im abgepackerten Bohrlochabschnitt hat sich eingestellt
- Dauer der initialen Druckeinwirkung sehr kurz, im Zeitraum von einigen 10 Sekunden bis einigen Minuten
- initiierte Druckdifferenz erlaubt eine aussagefähige Auflösung
- der Gesteinsverband hat auf die Druckerhöhung nicht mit einer Kluft- bzw. Schichtverbandaufweitung reagiert
- Zeitdauer der Druckerholung groß genug für Transmissivitätsbestimmung nach den Auswerteverfahren

Literatur:

- BREDEHOFT & PAPADOPULOS (1980): Forschungsbericht
- COOPER et al. (1967): Forschungsbericht
- DVWK (1994): Fachbuch
- GRISAK et al. (1985): Forschungsbericht
- RAMEY et al. (1975): Forschungsbericht
- WANG et al. (1978): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 4: Drill-Stem-Test

Allgemeine Information

Ziel:

Ermittlung der Durchlässigkeit von Grundwasserleitern mit mittleren bis kleinen Gebirgsdurchlässigkeiten.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für den Versuch hängen von der Versuchstechnik, der Versuchsdauer, der Einbautiefe und der Teststreckenanzahl ab, liegen üblicherweise zwischen DM 2000 und DM 5000 je Teststrecke.

Bewertung:

Das u.U. zeitaufwendige Verfahren eignet sich für den kombinierten Einsatz mit Pumpversuchen im Festgestein und erlaubt die vertikale Differenzierung eines kf-Profiles. Die Auswertung ist mit einigen Annahmen verknüpft, die im Einzelfall kritisch zu prüfen sind. In sehr gering durchlässigen Bereichen weist der DST methodische Vorteile gegenüber dem Slug-Test auf.

Anwendung

Voraussetzungen:

Wasserrechtliche Erlaubnis nach WHG liegt vor, Testzone unterhalb des Grundwasserspiegels, Bohrloch für Testgarnitur gangbar.

Theorie:

Diese Variante des Packertests wird vorzugsweise bei Gebirgsdurchlässigkeiten von 10⁻⁴ bis 10⁻⁷ m/s eingesetzt. In einem durch Doppelpacker abgedichteten Bohrlochintervall wird durch die Ventilsteuerung der Testgarnitur ein Wechsel zwischen Fließperioden und Druckaufbauphasen innerhalb des Gestänges erzeugt (Abb. E 4).

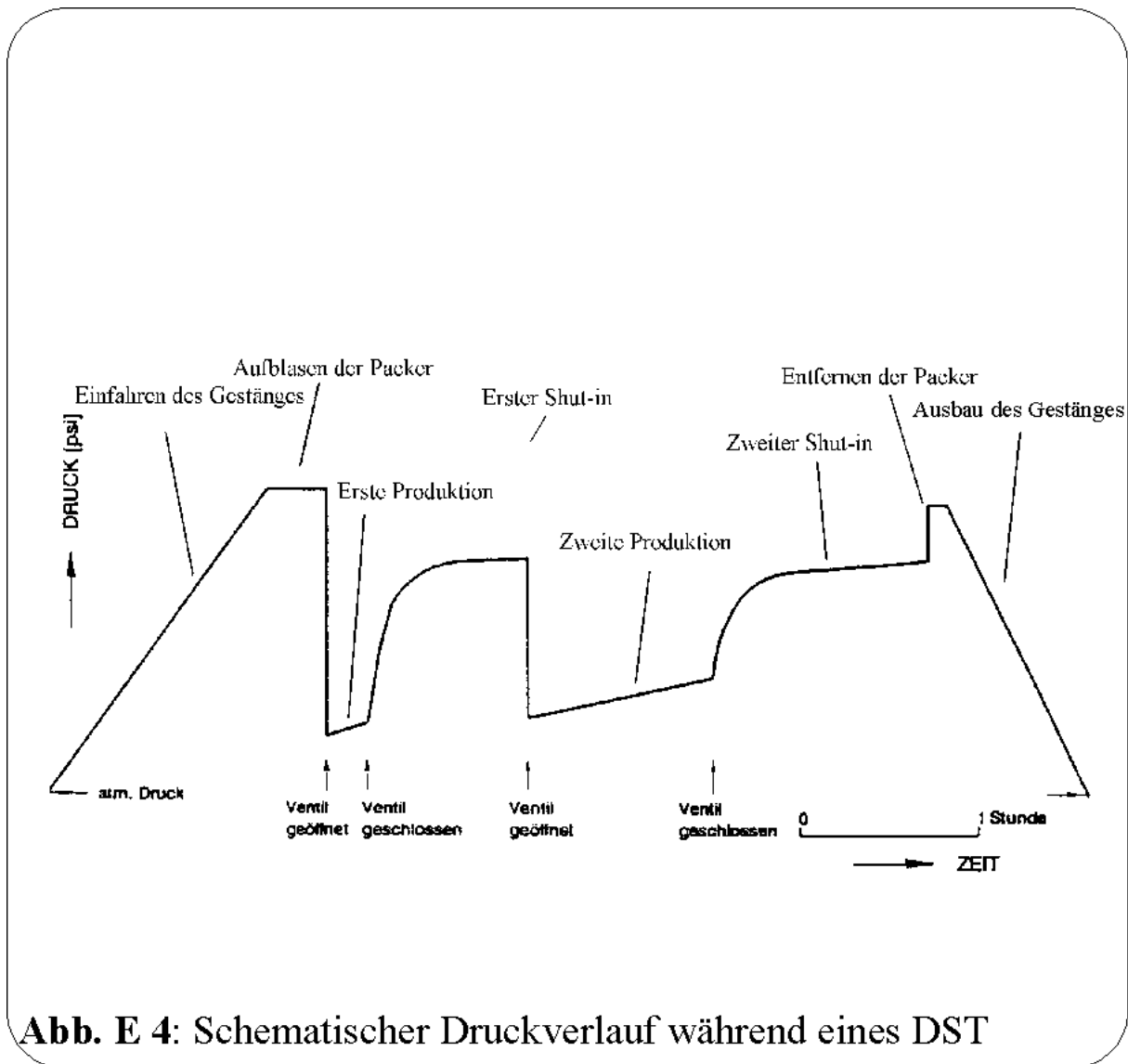


Abb. E 4: Schematischer Druckverlauf während eines DST

Abb. E4: Schematischer Druckverlauf während eines DST

Da stark unregelmäßige Bohrlochdurchmesser vertikale Umläufigkeiten erzeugen können, empfiehlt es sich, das Bohrloch vor dem Versuch mit einem Kaliber-Log (s. H 5) zu befahren.

Der zeitliche Verlauf der aufgezeichneten Druckphasen setzt sich aus Anteilen einer Slug-Test-Kurve und einer Pulse-Test-Kurve zusammen und kann als ein Maß für die Gebirgsdurchlässigkeit in unmittelbarer Umgebung des Bohrlochs verwendet werden.

Praxis:

Mit dieser Methode werden in aller Regel Bohrlochabschnitte (5 - 10 m) im wassererfüllten Untergrund (ca. 10 m unter Grundwasserspiegel) untersucht. Der Einbau der Testgarnitur erfolgt bei geschlossenem Ventil. Nach Setzen der Packer wird das Ventil als Beginn der 1. Fließperiode geöffnet. Nach 5 - 10 min wird das Testventil geschlossen, die erste Druckaufbauphase (initial shut-in) beginnt. Die Meßaufzeichnung erfolgt über Drucksensoren im Testintervall. Beide Phasen werden wiederholt und zeitlich ausgedehnt.

Zur Festlegung des Versuchsendes und qualitativer Bewertung der Messungen bereits während des Versuchs ist eine kontinuierliche graphische Darstellung des Verlaufs notwendig.

Die Zuflußrate q wird aus der Wasserspiegeländerung im Steigrohr während der Fließphase berechnet, die letzte Druckaufbaumessung (final shut-in) wird zur Bestimmung der Transmissivität herangezogen. Daneben sind die Temperatur (Fehler $\pm 1^\circ\text{C}$) zur Bestimmung der Viskositätswerte und die absolute Länge des Meßintervalls zu bestimmen, die vom Aufblähgrad der Packer abhängt und daher nur geschätzt werden kann (Fehler ± 4 cm).

Auswertung:

Eine Übersicht über die methodischen Auswerteansätze kann HEKEL (1994) entnommen werden.

- Schließphase

Die Daten werden als ein halblogarithmisches Druck- "Horner"-Zeit -Diagramm ("Horner-Plot") aufgetragen. Dieses Verfahren wird häufig durch die Länge der Produktionsphase beeinflusst und setzt stationäre Strömungsverhältnisse voraus. Daneben kann auch die Wiederanstiegsmethode nach THEIS (1935) angewendet werden.

- Fließphase

Fließphasen, in denen sich ein größerer Anteil der Druckerholung vollzieht, sind als Slug-Test zu betrachten (vgl. E 2). Näherungsweise lassen sich auch die relativ kurzen Fließphasen eines DST, die oft nur wenige % bis 10% der Druckerholung umfassen, mit dem Verfahren nach HVORSLEV (1951) auswerten.

Literatur:

- GRISAK (1985): Forschungsbericht
- GRINGARTEN et al. (1979): Forschungsbericht
- HEKEL (1994): Dissertation
- HORNER (1951): Forschungsbericht
- LFU Ba.-Wü. (1991): Leitfaden
- RAMEY et al. (1975): Forschungsbericht
- THEIS (1935): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 5: WD-Test

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der Wasseraunahmefähigkeit des Gebirges.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für den Versuch hängen von der Versuchstechnik, der Versuchsdauer, Einbautiefe und der Teststreckenanzahl ab, liegen meist zwischen DM 2000 und DM 5000 je Teststrecke.

Bewertung:

Das geotechnische Verfahren eignet sich für die Messung des Wasseraufnahmevermögens (Injezierbarkeit) des Untergrundes. Der herkömmliche WD-Test liefert lediglich eine Vergleichszahl für die Durchlässigkeit. Nach Durchführung eines WD-Tests kann aufgrund der Einbringung von Wasser in den Untergrund (ungeklärter Verbleib) keine repräsentative Grundwasserprobennahme mehr durchgeführt werden.

Anwendung

Voraussetzungen:

Wasserrechtliche Erlaubnis nach WHG liegt vor.

Theorie:

Wasser-Druck-Tests wurden in der ursprünglichen Versuchsdurchführung von LUGEON (1933) entwickelt. Während des WD-Tests wird in eine nach oben bzw. auch nach unten abgeschlossenen Bohrlochstrecke unter Druck Wasser eingepreßt (Abb. E 5).

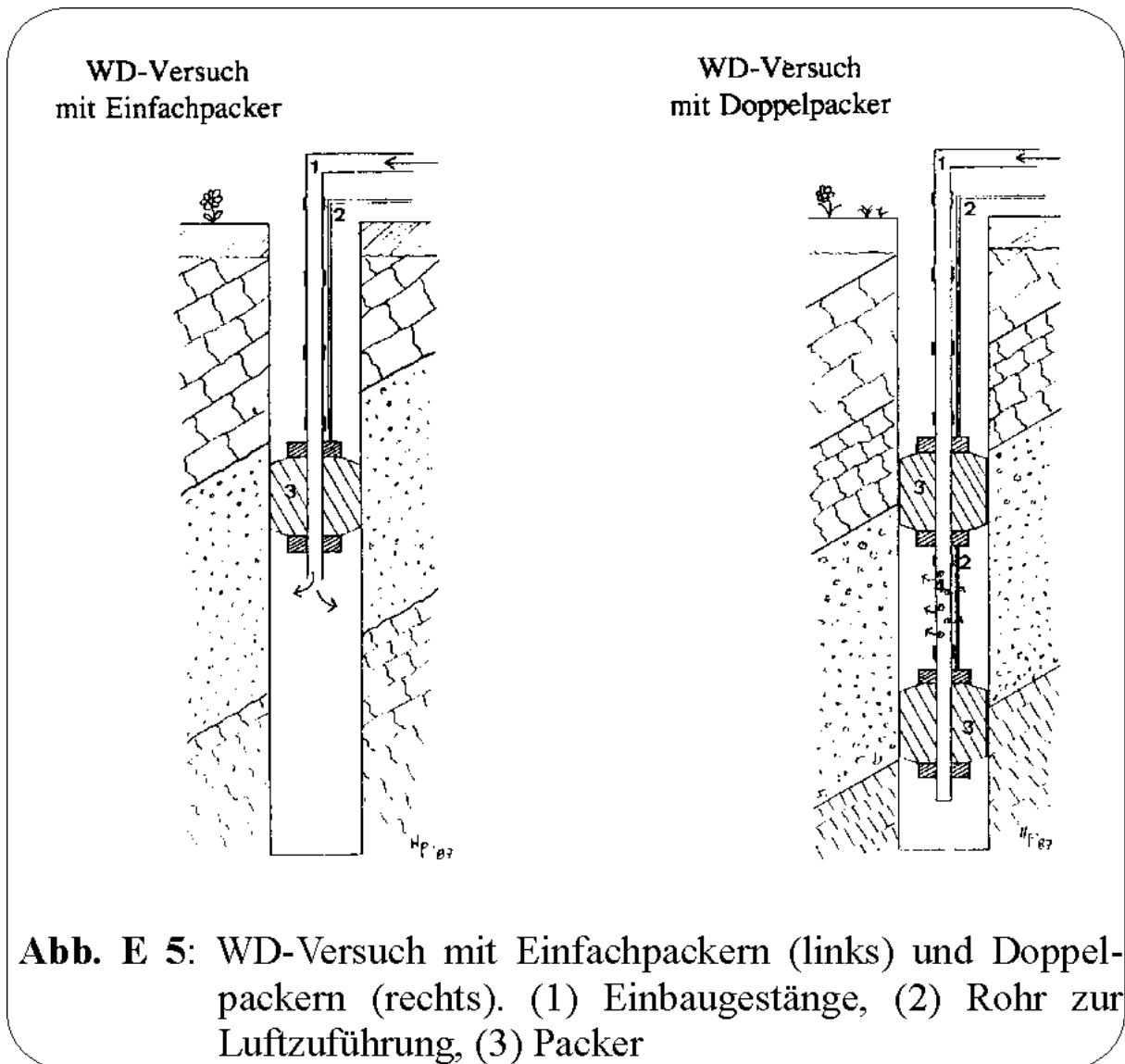


Abb. E 5: WD-Versuch mit Einfachpackern (links) und Doppelpackern (rechts). (1) Einbaugestänge, (2) Rohr zur Luftzuführung, (3) Packer

Abb. E5: WD-Versuch mit Einfachpackern und Doppelpackern

Die Durchflußrate, die in Abhängigkeit von der Druckstufe ins Gebirge eintritt, gibt Hinweise auf die Wasserdurchlässigkeit. Die Bestimmung der Durchlässigkeit aus einem WD-Test kann nur erfolgen, wenn während der Druckstufen keine Erosions- oder Verformungsvorgänge im Gebirge stattfinden.

Praxis:

Aufgrund der technischen Gegebenheiten des WD-Tests kommt lediglich eine Anwendungsmöglichkeit im standfesten Gebirge in Frage. Der Versuch beginnt nach gründlichem Klarpumpen mit Einbau des Gestänges und Festlegen der Verpreßstrecke (< 5 m). Der Druck wird mittels elektronischer Druckwandler direkt in der Verpreßstrecke gemessen und automatisch kontinuierlich registriert. Je nach Fragestellung, Versuchsziel und geologisch-technischen Rahmenbedingungen sind spezielle Abpreßschemata zu erarbeiten (LFU Ba.-Wü., 1991). Für die generelle Versuchsdurchführung schlägt HEITFELD (1979) folgendes Standardschema vor:

- Abpressen in mindestens 3 Druckstufen A - B - C - B - A
- Wahl der Druckstufen in Abh. von der zu erwartenden Gebirgsdurchlässigkeit zwischen 1 - 3 bar
- Die Messungen der Durchflußrate erfolgen in Minutenabständen übertage bis zur Konstanz der Aufnahme des Gebirges
- Dieser Druck muß 2 - 3 min gehalten werden, bevor die eigentliche Meßzeit $t > 3$ min beginnt
- treten während des Versuchs Crackvorgänge im Gebirge (Druckabfall) auf, soll versucht werden, die Druckstufe weiter zu fahren

SCHNEIDER (1987), GREMINGER (1991) und HEKEL (1994) weisen darauf hin, daß bei Verpreßzeiten zwischen 3-10min je Druckstufe keine stationären Verhältnisse erreicht werden und fordern daher einen einstufigen WD-Test.

Auswertung:

Grundlage der Auswertung ist die Annahme eines quasihomogenen-isotropen Gebirges. Die qualitative Ergebnisdarstellung der bei Druckkonstanz ermittelten Durchflußmengen erfolgt in einem Q-P-Diagramm [$l/min \cdot m$]. Eine Übersicht über die zu konstruierenden Hystereseschleifen und deren Interpretation ist in LFU Ba.-Wü. (1991) gegeben. Die Bestimmung des kf-Wertes kann nach empirischen Untersuchungsergebnissen von HEITFELD (1981) erfolgen. Danach gilt:

$$kf = (3,3 Q_{WD5}^2 - 1,3 Q_{WD5}) \cdot 10^{-8}$$

Der Gültigkeitsbereich der Formel ist auf Verpressmengen zwischen 1 - 25 $l/min \cdot m$ beschränkt, entsprechend lassen sich lediglich Durchlässigkeiten von $2 \cdot 10^{-5}$ bis $2 \cdot 10^{-8}$ m/s berechnen. Die Auswertung nach der Brunnenformel von DUPUIT-THIEM (1906) kann die inneren und äußeren Randbedingungen sowie weitere Modellkomponenten nicht berücksichtigen und setzt eine stationäre Strömung (d.h. Verpreßrate und Druck konstant) voraus. Die Auswertung eines einstufigen WD-Tests kann nach von SCHNEIDER (1987) und GREMINGER (1991) vorgestellten Typkurven- und Geradlinienverfahren erfolgen.

Literatur:

- DUPUIT-THIEM (1906): Forschungsbericht
- DGEG (1984): Forschungsbericht
- GREMINGER (1991): Forschungsbericht
- HEITFELD (1979): Forschungsbericht
- HEKEL (1994): Disseration
- LFU Ba.-Wü. (1991): Handbuch
- LUGEON (1933): Forschungsbericht
- SCHNEIDER (1987): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 6: Das Einschwingverfahren

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der Transmissivität in gespannten und ungespannten Aquiferen ohne Zugabe bzw. Entnahme von Wasser.

Kosten/Aufwand:

Geringer Zeitaufwand, die Kosten für Versuchsdurchführung und Auswertung betragen zwischen DM 2000 bis DM 4000.

Bewertung:

Das methodisch hinsichtlich Durchführung und Auswertung z.T. kritisch zu betrachtende, noch nicht optimierte, jedoch rasch ablaufende Einschwingverfahren ist besonders dann sinnvoll, wenn am Standort der Kontaminationsherd weder mobilisiert, noch wegen Entsorgungsproblemen Wasser entnommen werden soll.

Anwendung

Voraussetzungen:

Meßstellen vorhanden.

Theorie:

Grundwasserleiter sind schwingungsfähige Systeme. Amplitude, Frequenz und Dämpfung der Schwingung hängen im wesentlichen von der Transmissivität und der Wasserspiegellage des Aquifers ab (LFU Ba.-Wü., 1991). Im Einschwingverfahren nach KRAUSS (1977) wird der Grundwasserspiegel mittels Druckerhöhung ausgelenkt. Nach MÜLLER (1984) ist das Verfahren auch auf ungespannte Grundwasserleiter anwendbar. Nach Druckentlastung kehrt der Wasserstand zum Ausgangsniveau zurück. Dabei sind zwei Typen des Wiederanstieges zu unterscheiden:

- ein oszillierender Verlauf, bei dem der Wasserstand über die Nullage hinausschwingt ($b < 1$)
- ein exponentieller Verlauf ($b > 1$)

Ein schwingungsfähiges System kann durch die Parameter Dämpfungskoeffizient w und Eigenfrequenz b beschrieben werden. Diese Systemparameter hängen wiederum von der Transmissivität, dem Speicherkoeffizient und der Brunnengeometrie ab.

Praxis:

Das Anwendungsspektrum dieser Methode liegt bei kf-Werten zwischen 10^{-3} und 10^{-7} m/s. Bei Auswahl der Grundwassermeßstelle ist darauf zu achten, daß die Filterstrecke nicht oberhalb des Grundwasserspiegels liegt. In der Praxis hat sich ein Meßstellendurchmesser zwischen 50 - 150 mm bewährt. Nach Einbau und Eichung der Drucksonde wird die Meßstelle luftdicht verschlossen. Der Wasserspiegel wird durch Einspeisung von Druckluft einige dm herabgedrückt (Abb. E 6).

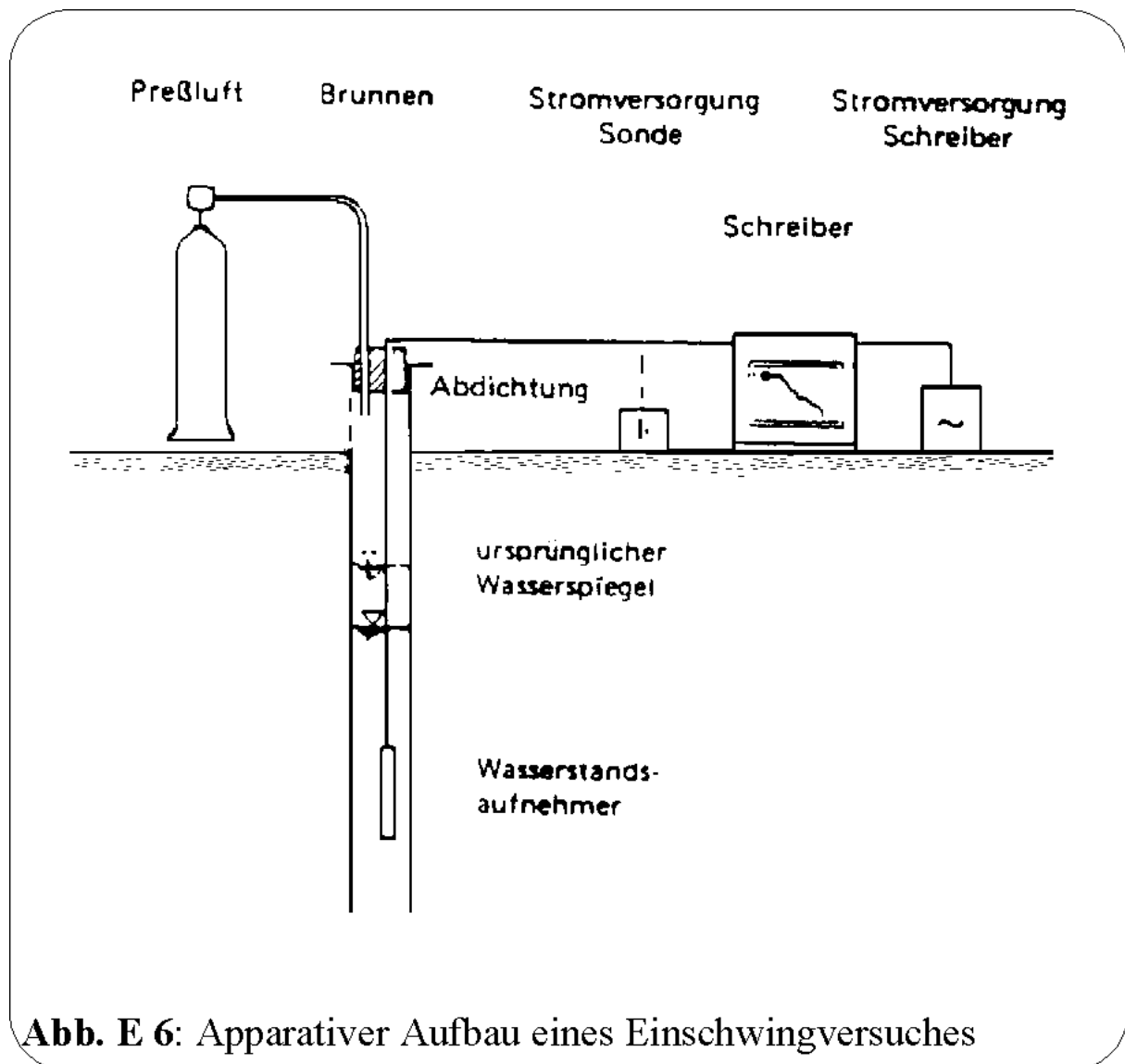


Abb. E6: Apparativer Aufbau eines Einschwingversuches

Nachdem sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat, wird der Überdruck schlagartig entfernt. Der Wasserstand kehrt zu seinem Ausgangsniveau zurück. Die Wasserstandsänderungen werden kontinuierlich im Sekundentakt gemessen.

Eine Übersicht über automatische Datensammler ist in DVWK (1994) gegeben. Die Daten werden abschließend mittels EDV ausgewertet.

Auswertung:

Unter der Annahme eines homogenen, isotropen Grundwasserleiters mit laminaren Strömungsverhältnissen trägt man den Wiederanstieg gegen die Zeit auf.

Der Anstiegskurve ist die Steigung der Exponentialfunktion E und die Periode der Schwankungen zu entnehmen. Danach lassen sich die Systemparameter Eigenfrequenz und Dämpfungskoeffizient rechnerisch bestimmen (KRAUSS, 1977).

Insgesamt wird nur ein geringes Integrationsvolumen von dem Versuch erfaßt. Die Auswertung ist mit Fehlerquellen behaftet, so kann z.B. das Schwingen des Wassers im Filterkies nur ungenügend verhindert werden. Im Übergangsbereich von exponentiellem zu oszillierendem Kurvenverlauf ergeben sich Unsicherheiten bei der Bestimmung der Transmissivität.

Literatur:

- DVWK (1994): Fachbuch
- LFU Ba.-Wü. (1991): Handbuch
- KRAUSS (1974, 1977): Forschungsberichte
- MÜLLER (1984): Fachbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 7: Fluid-Logging

Allgemeine Information

Ziel:

Ortung von Kluftwasserzutritten in einer Bohrung sowie Bestimmung der Durchlässigkeitsverteilung über eine Bohrstrecke.

Kosten/Aufwand:

Bei Teufen < 100 m ist ein Meßzeitraum von 1-2 Tagen je Bohrung anzusetzen, Kosten incl. Auswertung ca. DM 10.000.

Bewertung:

Die Auswertung liefert ein differenziertes kf-Profil mit der Tiefe. Das Fluid-Logging stellt eine hochauflösende und zeitsparende Methode zur Lokalisierung und Quantifizierung von Bohrlochzuflüssen dar. Das Verfahren stellt eine kostengünstige Alternative zu den in Serie durchgeführten Doppelpackertests dar.

Anwendung

Voraussetzungen:

Wasserrechtliche Erlaubnis nach dem WHG liegt vor, Bohrloch für Gestänge und Meßsonden gangbar.

Theorie:

Das Fluid-Logging ist ein hydraulisches Testverfahren mit dem in einer Bohrung alle Zuflüßzonen lokalisiert und quantifiziert werden können (TSANG & HUFSCHMIED, 1988). Während eines Pumpversuches speisen die durchlässigen Gebirgsbereiche (Klüfte) entsprechend ihrer Transmissivität eine bestimmte Menge Wasser in das Bohrloch ein. Wenn sich der Mineralisierungsgrad der Kluftwässer von dem der Bohrlochflüssigkeit unterscheidet, können die Zuflüsse durch Salino-Logs (s. H 3) lokalisiert werden (Abb. E 7).

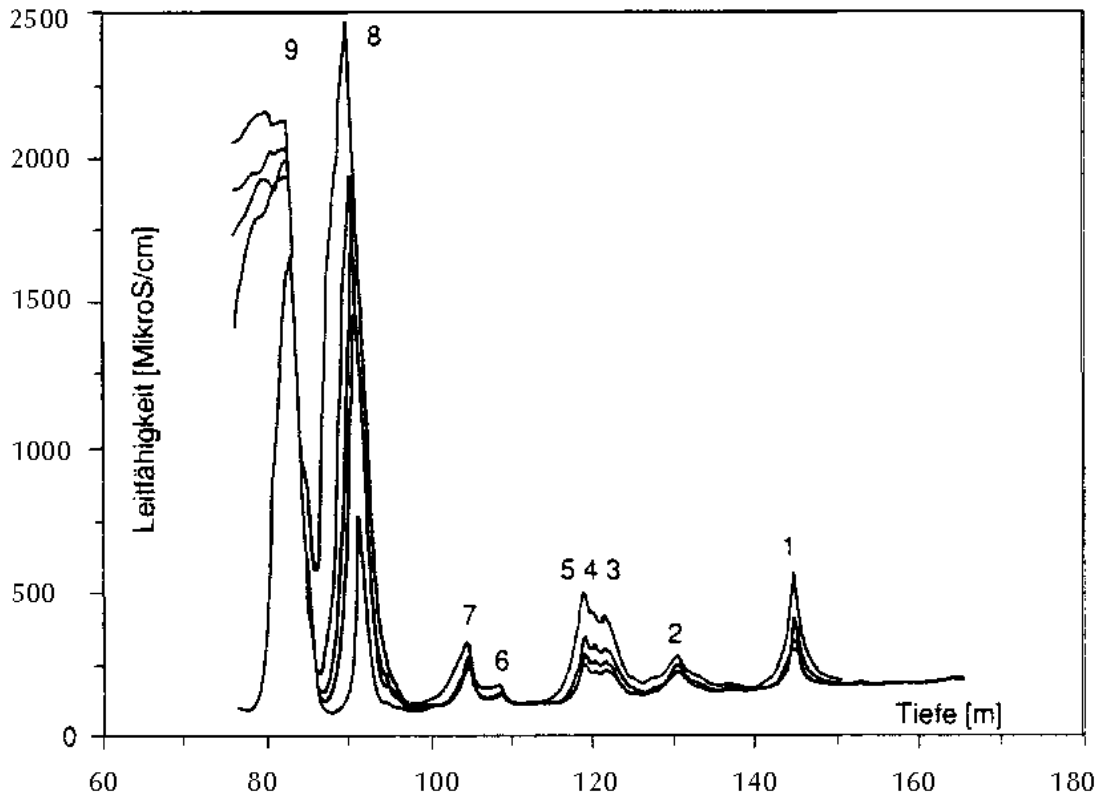


Abb. E 7: Fluid-Logging Felddaten aus einer Bohrung

Abb. E7: Fluid-Logging Felddaten aus einer Bohrung

Das Verfahren wird seit einigen Jahren erfolgreich in flachen und tiefen Bohrungen in Kluffeststeinen und porösen Grundwasserleitern eingesetzt. Ein weiteres Einsatzgebiet ergab sich in Grundwassermeßstellen auf dem Gelände des Modellstandortes Mühlacker. Dabei werden Informationen über die Lage und Größe von Zuflußbereichen im Filterstreckenabschnitt geliefert und eine Kontrolle der Dichtigkeit von Vollrohrstrecken und Rohrverbindungen durchgeführt (ERTEL, Diss. in Bearbeitung).

Praxis:

Die Durchführung von Fluid-Loggings läßt sich in die Bereiche Fluidaustausch, Pumpversuch, Leitfähigkeits- und Temperatur-Logs sowie EDV zur Kontrolle, Registrierung und Auswertung der Messungen unterteilen. Eine ausführliche Vorstellung und Diskussion des Verfahrens führt HEKEL (1994) durch. Im Vorfeld des Versuches sind durch Klarpumpen des Bohrlochs sämtliche in das Gebirge verpresste Fluide zu entfernen und es ist durch Beobach-

zung zu gewährleisten, daß im Ruhezustand keine vertikalen Strömungsvorgänge im Bohrloch stattfinden.

1. Austausch des Bohrlochfluids gegen ein Kontrastfluid deutlich niedrigerer Leitfähigkeit unter Beibehaltung eines konstanten Wasserspiegels (keine Infiltration), Kontrolle der Homogenisierung durch Null-Log
2. Beginn der Pumpphase (Aktivierung von höher mineralisierten Zuflüssen in das Bohrloch) mit konstanter Förderrate
3. Kontinuierliches Fahren von Salino-Logs, Erfassung der Zuflußstellen durch Leitfähigkeitspeaks. Die Meßfolge der Logs hängt dabei ab von der:
 - absoluten Position der Zuflüsse im Bohrloch
 - relativen Position der Zuflüsse zueinander (Peaküberlagerung)

Auswertung:

Die Bestimmung der Transmissivität über die gesamte Filterstrecke erfolgt über die Auswertung des Wiederanstieges nach THEIS (1935). Für die Quantifizierung von Zuflüssen in Bohrlöchern stehen mehrere Ansätze zur Verfügung, die auch zur Verifizierung der Ergebnisse gegenübergestellt werden sollten (HEKEL, 1994). Bei der Auswertung werden nicht nur der advective Transport, sondern auch die Mischung der Wasserinhaltsstoffe im fließenden Wasser berücksichtigt:

- Partielle Momentenmethode
- Frontenmethode
- Mischungsmodell

Die Gesamttransmissivität muß der Summe der gesuchten Teiltransmissivitäten entsprechen. Die Auflösungsgrenze liegt je nach Abstand der Kluftzutritte und der Mineralisierung der Kluftfluide zwischen 1/10 - 1/1000 der Gesamttransmissivität.

Literatur:

- ERTEL (1995): Dissertation in Bearbeitung
- HEKEL (1994): Dissertation
- HUFSCHEID (1983, 1988): Forschungsbericht
- LOEW et al. (1988): Forschungsbericht
- TSANG & HUFSCHEID (1988): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 8: Auffüllversuche

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der Durchlässigkeit eines Aquifers.

Kosten/Aufwand:

Der technische Aufwand ist als gering einzustufen, die Versuchskosten bewegen sich zwischen DM 2000 bis DM 4000.

Bewertung:

In der Auswertung bleibt die Porensättigung unberücksichtigt. Der einfach durchzuführende und rasch ablaufende Versuch wird meist im Lockersediment durchgeführt, kann aber auch im geklüfteten Festgestein eingesetzt werden. Es findet keine Förderung kontaminierten Wassers statt, die spätere Probennahme ist jedoch problematisch.

Anwendung

Voraussetzungen:

Wasserrechtliche Erlaubnis nach dem WHG liegt vor, Bohrloch voll verrohrt und mit offener Sohle.

Theorie:

Bei Auffüllversuchen wird Wasser in ein Bohrloch oder Peilrohr eingefüllt und dem Grundwasserleiter zugeführt. Danach wird das Absinken des durch die Wasserzugabe künstlich aufgehöhten Wasserspiegels in der Zeit gemessen. Der Auffüllversuch nach KOLLBRUNNER (1946) und MAAG (1941) erfordert ein vollverrohrt, sohlenoffenes Bohrloch, das im unteren Bereich Grundwasser erschließt.

Ein weiterer, ebenfalls sehr einfacher hydraulischer Test an Bohrlöchern ist der Open-end-Test. In einem voll verrohrten, sohlenoffenen Bohrloch wird durch die konstante Zugabe von Wasser der Menge Q die Wassersäule im Bohrloch gegenüber der Ausgangsspiegellage um den Betrag h aufgehöht. Für eine konstante Spiegelhöhe h müssen sich die zeitkonstante Wasserzugabe und die Aufnahme durch das Gebirge entsprechen. Der Aufhöhbetrag ist ein Maß für die Durchlässigkeit innerhalb der geschätzten Reichweite der Aufhöhung.

Praxis:

Der Radius r des Bohrlochs sollte wesentlich kleiner als die Höhe der Wassersäule im Bohrloch sein. Vor Beginn des Versuchs muß sichergestellt sein, daß nach Abschluß der Bohrarbeiten gründlich gespült wurde, da sedimentierte Trübstoffe aus Bohrklein und Spülung die Durchlässigkeit der Bohrlochsohle erheblich vermindern können. Bei Open-end-Tests wird das Wasser von oben in das Bohrloch eingegeben, wobei entweder ein freier Spiegel an der Rohroberkante oder ein Druckwasserspiegel, der an einem Manometer registriert wird, unterhalten werden kann (Abb. E 8).

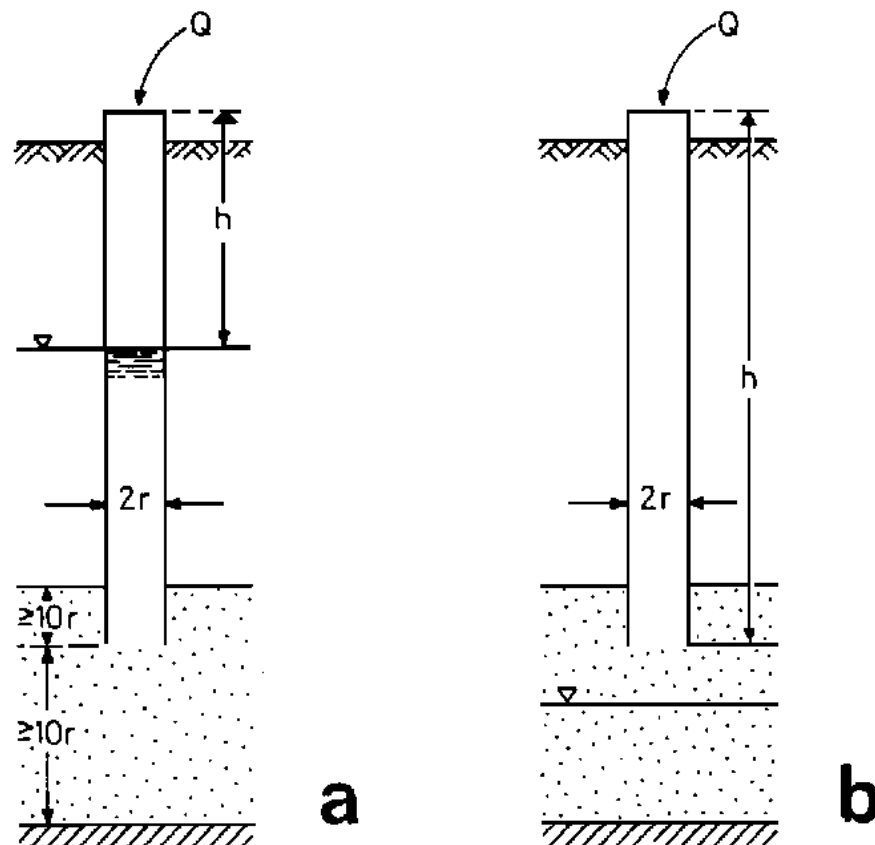


Abb. E 8: Schemadarstellung eines Open-end-Tests (a) in einem gespannten Grundwasserleiter (Rohrende unterhalb des Grundwasserspiegels) und (b) in einem freien Grundwasserleiter, (Rohrende oberhalb des Grundwasserspiegels)

Abb. E8: Schemadarstellung eines Open-End-Tests

Beim Auffüllversuch nach KOLLBRUNNER (1946) und MAAG (1941) wird eine bestimmte Menge Wasser zugeführt, die eine Aufhöhung des Wasserspiegels im Rohr über dem Ruhewasserspiegel bewirkt. Zu einem späteren Zeitpunkt wird die Absenkung des Wasserspiegels gemessen.

Auswertung:

Unter der Annahme der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes und von radialen Strömungsbedingungen können Open-end-Tests (LANGGUTH & VOIGT (1980) ausgewertet werden. Die Auswertung gilt streng genommen nur für gesättigte, poröse Gesteine. In partiell gesättigten porösen Gesteinen wird die Durchlässigkeit entscheidend durch den Sättigungsgrad beeinflusst, der in der Auswertung nicht berücksichtigt wird. Das Verfahren nach KOLLBRUNNER (1946) und MAAG (1941) kann ausgewertet werden unter der Voraussetzung, daß der Aquifer homogen und isotrop ist (LANGGUTH & VOIGT, 1980).

Diese Annahme ist unter Berücksichtigung der natürlichen Aquiferverhältnisse nur selten verwirklicht. Aufgrund der aus der praktischen Durchführung herrührenden Unsicherheiten (Trübstoffe aus Spülung und Bohrgut vorhanden) sowie der theoretischen Annahmen liegen in der Regel die mit diesem Verfahren ermittelten Durchlässigkeiten unter den tatsächlichen Werten.

Literatur:

- DVWK (1994): Fachbuch
- LANGGUTH & VOIGT (1980): Lehrbuch
- KOLLBRUNNER (1946): Lehrbuch
- MAAG (1941): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 9: Markierungsversuche

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der Grundwasserfließrichtung, der Abstandsgeschwindigkeit, des durchflußwirksamen Porenvolumens (falls Durchlässigkeitsbeiwert und der hydraulische Gradient bekannt) und der Dispersion, bzw. der Dispersivität.

Kosten/Aufwand:

Die Gesamtkosten für den aufwendigen Feldversuch können je nach Größe des Meßnetzes, Anzahl der Meßstellen, Probenanzahl und Versuchsdauer zwischen DM 10.000 und DM 30.000 betragen.

Bewertung:

Die Bedeutung von Markierungsversuchen liegt in einer (natürlichen) Simulation einer möglichen Schadstoffausbreitung in einem Aquifer. Die meist kostenintensiven Tracertests unter natürlichem Gradienten erbringen den direkten Nachweis einer hydraulischen Verbindung zwischen einem Gefahrenherd und abstromigen Gebieten. Tracertests unter künstlichem Gradienten (Injektion oder Entnahme von Wasser) sind bei hoher Meßstellendichte geeignet, kleinräumige Strukturen eines heterogenen Aquifers zu detektieren.

Anwendung

Voraussetzungen:

Die Einbringung von Markierungsstoffen in das Grundwasser bedarf als Benutzung des Grundwassers einer wasserrechtlichen Erlaubnis (§ 3, Abs. 1, Ziff. 5 WHG), die bei der unteren Wasserbehörde zu beantragen ist. Eine Erlaubnis für das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser darf nur dann erteilt werden, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist (§34, Abs.1, WHG). Bei der Verwendung von radioaktiven Markierungsmitteln sind die Bestimmungen der Strahlenschutzverordnung vom 13.10.1976 (BGBl. I: 2905) zu beachten. Bei der Verwendung von biologischen Markierungsmitteln ist das Bundesseuchengesetz in der Fassung vom 18.12.1979 (BGBl. I: 2262, geändert 18.08.1980 [BGBl. I: 1469, 2218] und 27.06.1985 [BGBl. I: 1254]) zu beachten. Während des Genehmigungsverfahrens wird auch das Geologische Landesamt informiert, das die Daten von Grundwassermarkierungsversuchen zentral archiviert. Damit können u.a. Mehrfachversuche und eine Überlagerung mit bereits durchgeführten oder laufenden Versuchen vermieden werden.

Theorie:

Das Feldexperiment besteht aus der Eingabe eines Markierungsmittels (Tracersubstanz) in bestimmter Konzentration und Menge in der Eingabestelle. Durch Probennahmen zu definierten Zeitpunkten an den Kontrollstellen kann die zeitliche und räumliche Stoffausbreitung bestimmt werden.

Praxis:

Im Vorfeld eines Markierungsversuches ist das genaue Untersuchungsziel festzulegen. Hierzu ist ein genauer Versuchsplan mit folgenden Angaben aufzustellen:

- Lage der Eingabe- und Kontrollstellen (Meßnetz, Abb. E 9a)
- Art und Menge(n) des bzw. der Markierungsmittel
- Zeitpunkt(e) und Art der Eingabe(n)
- Menge der Vor- und Nachspülung bei der Markierungsmiteingabe
- Zeitplan für die Probennahme und Vorgaben für den Probennahmevergang
- Plan für begleitende Wasserstands- und Abflußmessungen

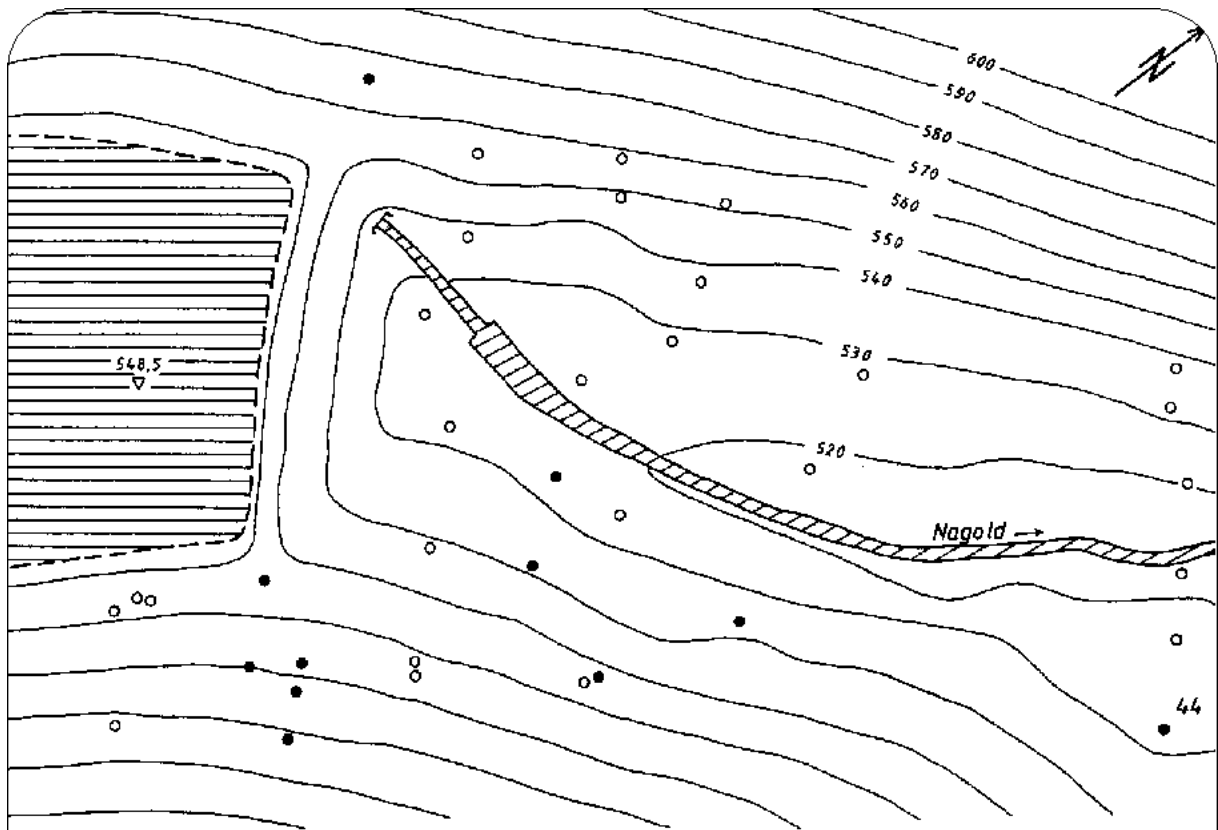


Abb. E 9a: Meßstellennetz eines Markierungsversuches im Nord-schwarzwald zur Überprüfung von möglichen Wasserverlusten aus einem Stausee (gestreift). Innerhalb des Meßstellennetzes (Kreissignaturen) sind die positiven Farbnachweise (Uranin) als ausgefüllte Kreise dargestellt.

Abb. E9a: Meßstellennetz eines Markierungsversuches

Detaillierte Angaben zur Planung, Durchführung und Auswertung der Markierungsversuche sind in KÄSS (1992) zusammengestellt. Die Wahl eines Tracers hängt in jedem Einzelfall von der Aufgabenstellung, dem Versuchsfeld und der Art des Nachweises ab. Die Tracer unterscheiden sich in lösliche Stoffe (z.B. Farbstoffe, Salze, Isotope) und Triftstoffe (z.B. gefärbte Bärlappsporen, schadlose Bakterien, Polystyrolkügelchen).

In der Praxis ist Uranin (unechter, fluoreszierender Farbstoff) einer der in Baden-Württemberg am meisten eingesetzten Tracer. Allgemein gilt, daß ein Tracer einzusetzen ist, dessen Sorptions- und Zerfallseigenschaften weitgehendst bekannt und mathematisch erfassbar sind.

Ein Markierungsversuch kann einen Grundwasserleiter auf Jahre hin beeinträchtigen. Ferner kann das Markierungsmittel unter ungünstigen Bedingungen in genutzten Fassungen sichtbar austreten. In solchen Fällen sollten die betroffenen Gemeinden vor Versuchsbeginn informiert werden und es muß eine alternative Wasserversorgung gewährleistet sein. Isotope wie z.B. Deuterium oder $^{18}\text{-O}$ stellen natürliche Tracer dar. Durch entsprechende Untersuchungen lassen sich oft Markierungsversuche mit Tracereingabe vermeiden.

Die Tracereingabe kann entweder möglichst rasch oder kontinuierlich über einen längeren Zeitraum erfolgen. Der Markierungsstoff sollte über die gesamte Aquifermächtigkeit und nicht in die ungesättigte Zone eingegeben werden. Dies ist in der Praxis häufig nicht möglich. Die Farbeingabe kann in Grundwassermeßstellen oder natürlichen Schwinden (z.B. Dolinen und Schürfgruben) erfolgen. Die Eingabemeßstelle muß in jedem Fall ein gutes Schluckvermögen aufweisen, was ggf. durch einen Schluckversuch vorab zu prüfen ist.

Wenn die Filterstrecke bis oberhalb des Grundwasserspiegels reicht, können durch zu starke Aufhöhung infolge Spülung die natürlichen Fließverhältnisse gestört werden (Aktivierung inaktiver Fließwege). Die Dosierung der Eingabemenge kann nach empirischen Verfahren überschlägig berechnet werden (u.a. KÄSS, 1992). Die Beprobungsabstände sind so zu wählen, daß der gesamte Tracerdurchgang verfolgt werden kann. Die Gesamtbeprobungszeit (meist etwa 50 - 100 Tage) richtet sich nach dem Auftreten des Konzentrationsmaximums ($t_{c_{max}}$) und sollte selbst in homogenen Aquiferen den zweifachen Zeitwert von $t_{c_{max}}$ nicht unterschreiten (GLA, 1994).

Bei der Probennahme sind Verschleppungen des Markierungsmittels sicher zu vermeiden, folglich darf die Eingabe des Tracers nicht durch die Probennehmer erfolgen.

Bei Verwendung von Fluoreszenztracern ist eine direkte Messung der in den Entnahmemeßstellen anströmenden Konzentrationen möglich (BARCZEWSKI & MARSCHALL, 1987). Prinzipiell besteht bei diesen in situ-Messungen die Gefahr einer Falschmessung bei Eintrübung des Grundwassers.

Auswertung:

Tracerversuche können nur dann exakt mit analytischen Verfahren ausgewertet werden, wenn von einem linearen oder radialen Strömungsfeld ausgegangen werden kann. In einem Aquifer wird der Transport einer gelösten Substanz von der hydrodynamischen Dispersion (mechanische Dispersion und molekulare Diffusion) sowie von Sorptions-, Desorptions- und Zerfallsvorgängen und turbulenten Fließvorgängen bestimmt. Der Transportvorgang kann auf diesen physikalischen Grundlagen durch Differentialgleichungen des allgemeinen Massentransportes beschrieben werden (BEAR, 1979). Innerhalb dieses Gleichungssystems müssen verschieden Grundannahmen (Modellvorstellungen) getroffen werden (vgl. GLA Ba.-Wü., 1994). Eine tabellarische Zusammenstellung der praktikablen analytischen Lösungen kann z.B. SCHWEIZER et al. (1985) entnommen werden.

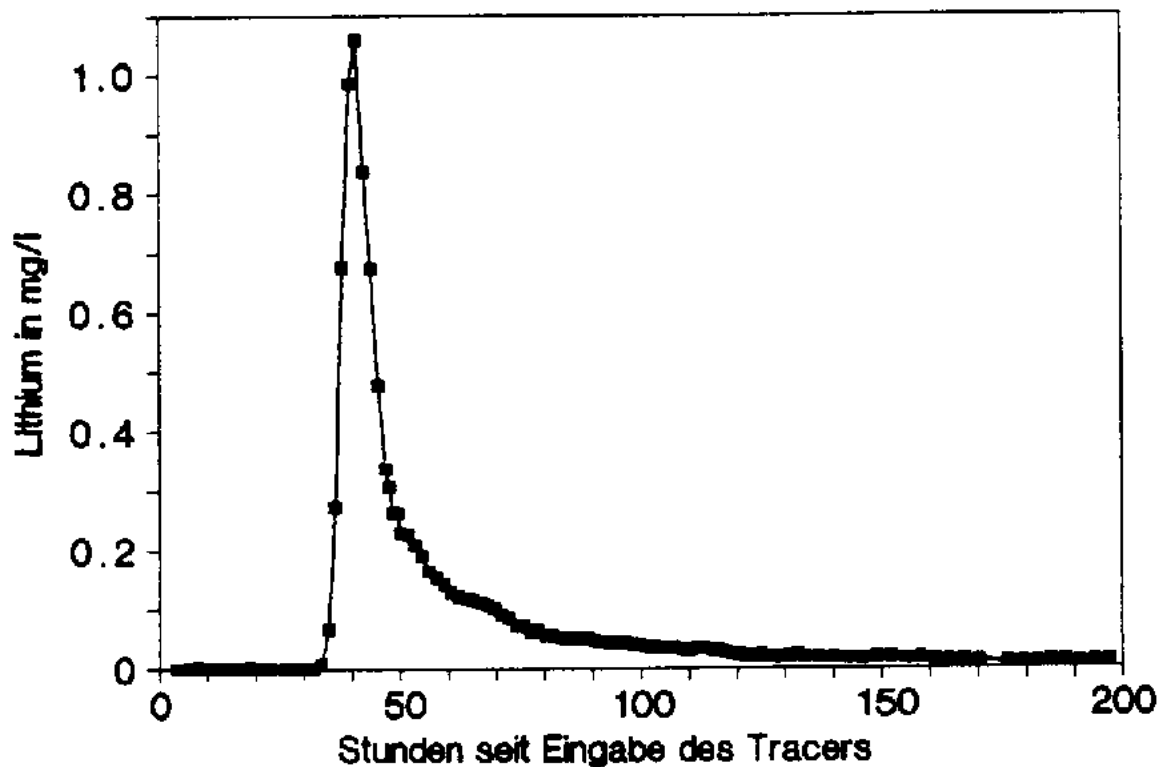


Abb. E 9b: Darstellung einer Tracerdurchgangskurve

Abb. E9b: Darstellung einer Tracerdurchgangskurve

Die Auswertung von Markierungsversuchen erfolgt in den meisten Fällen (stoßförmige Eingabe) anhand der zeitlichen Konzentrationsveränderung an einem Ort. Es lassen sich die Auswertung einer Tracerdurchgangskurve, deren Darstellung als Summenkurve und die Beschreibung analytischer Lösungen des Tracertransportes als Typkurve unterscheiden.

Aus den Tracerkurven lassen sich folgende Aquiferparameter ermitteln:

- Abstandsgeschwindigkeiten
- maximale Abstandsgeschwindigkeit
- dominierende Abstandsgeschwindigkeit
- mediane Abstandsgeschwindigkeit
- mittlere Abstandsgeschwindigkeit
- effektive Geschwindigkeit
- kürzeste Verweilzeit
- Wiederausbringungsrate, absolut und anteilmäßig an allen Beprobungsstellen

Weitere Auswertungen führen zu:

- longitudinaler und transversaler Dispersivität
- durchflusswirksamen Porenvolumen

Literatur:

- BARCZEWSKI & MARSCHALL (1987): Forschungsbericht
- BEAR (1979): Lehrbuch
- DROST (1983): Forschungsbericht
- GLA (1994): Informationen
- DVWK (1994): Seminarband
- DVWK (1994): Schriften
- KÄSS (1992): Lehrbuch
- KLOTZ (1994): Forschungsbericht
- MARSCHALL (1993): Forschungsbericht
- MALOSZEWSKI (1992): Forschungsbericht
- SCHWEIZER et al. (1985): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 10: Korngrößenanalyse

Allgemeine Information

Ziel:

Ermittlung der Durchlässigkeit eines Sediments aus der Korngrößenverteilung.

Kosten/Aufwand:

Rasches und kostengünstiges Verfahren, Kosten incl. Probennahme, Versuchsdurchführung und Auswertung ca. DM 200 bis DM 400.

Bewertung:

Die Methode liefert kostengünstig und rasch Ergebnisse, die jedoch lediglich orientierenden Charakter besitzen. Das Verfahren kann zur Erstellung eines vertikalen kf-Profiles herangezogen werden (Bohrung), sollte jedoch immer nur in Kombination mit anderen Methoden eingesetzt werden.

Anwendung

Voraussetzungen:

Proben im Durchlässigkeitsbereich zwischen $k_f = 10^{-3}$ bis 10^{-5} m/s.

Theorie:

Die spezifische Durchlässigkeit eines Lockergesteins hängt von der Kornverteilung (d_w = wirksame Korngröße) ab. Dieser empirisch belegte Zusammenhang gilt im Einzelfall nur für Wasser einer bestimmten Viskosität (temperaturabhängig).

$$k_f = C * d_w^2$$

C ist als empirischer Beiwert abhängig vom lithologischen Aufbau und der Ungleichförmigkeit $U = d_{60}/d_{10}$.

Praxis:

Maßgebend für die Untersuchung ist die Gewinnung eines repräsentativen Korngemisches. Die erforderliche Probenmenge ist abhängig von der Korngröße (z.B. Sand 200 - 500 g; Kies 2 - 20 kg). Bei der Probennahme ist eine mögliche Ausschlammung des Feinkornanteils zu berücksichtigen. Die Ermittlung der Kornverteilung im Labor durch Sieben und Schlämmen sollte in Anlehnung an DIN 18123 erfolgen. Anschließend wird der prozentuale Anteil der

einzelnen Korngrößen bestimmt und als kumulative Kurve semilogarithmisch dargestellt (Abb. E 10).

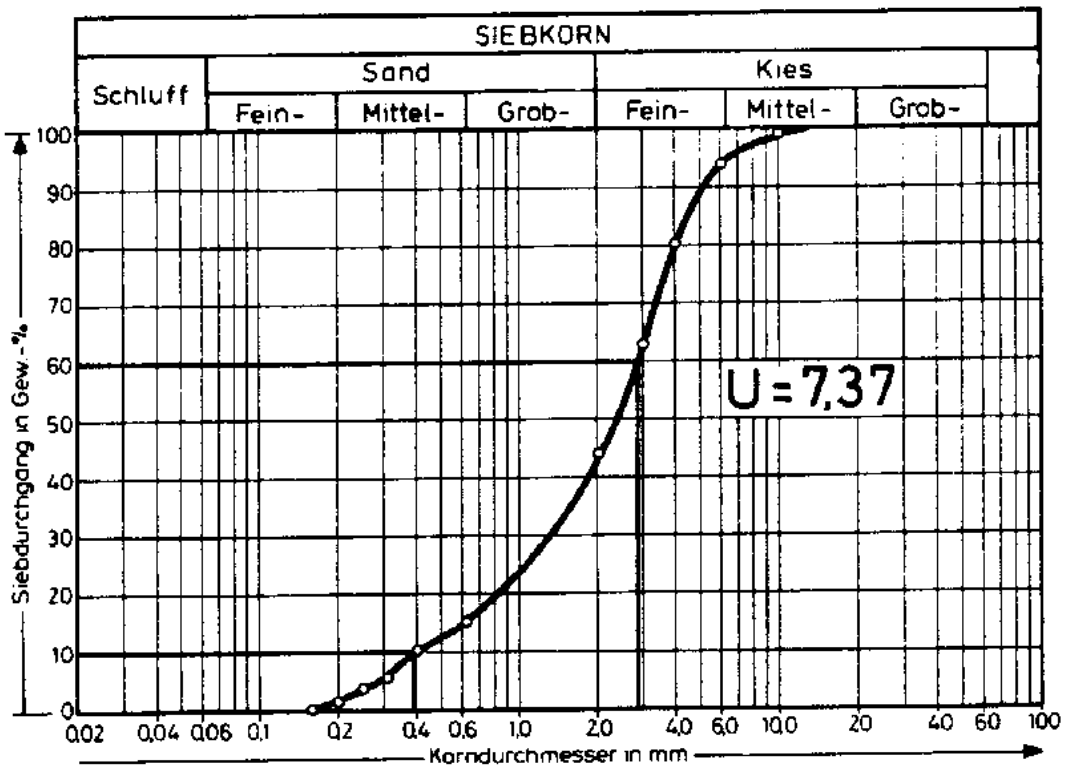


Abb. E 10: Siebcurve eines Korngemisches mit der Ungleichförmigkeit $U = d_{10}/d_{60} = 7,37$

Abb. E10: Siebcurve eines Korngemisches

Auswertung:

- Auswertung nach **HAZEN** (1893):

$U \leq 5$ und $d_w \sim d_{10}$ sind Voraussetzung. Danach ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_f :

$$k_f = 0,016 d_{10}^2 (0,7 + 0,03 t)$$

- Auswertung nach **BEYER** (1964): Die Sieblinienauswertung baut auf der Formel von HAZEN auf, variiert jedoch den empirischen Beiwert C in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeit. Die Gültigkeitsgrenzen sind $0,06 \leq d_{10} \leq 0,6$ und $1 \leq U \leq 20$. Mit Kenntnis von d_{10} und d_{60} bestimmt man U und entnimmt den k_f -Wert einer Tabelle. In einer vergleichenden Untersuchung der vorhandenen empirischen Verfahren erweist sich die Auswertung nach BEYER als am raschesten und zuverlässigsten (PEKDEGER & SCHULZ, 1975).

- Auswertung nach **KOZENY/KÖHLER** (1965): Das Verfahren ist rechnerisch aufweniger und vollzieht eine statistische Auswertung der einzelnen Kornklassen. Daneben werden der Rauigkeitsbeiwert der Körner und die Porenziffer berücksichtigt.

Der prinzipielle Nachteil all dieser Berechnungsmethoden besteht darin, daß sie Anisotropieeffekte (unterschiedliche Verdichtungs- und Einregelungsverhältnisse), wie sie einen natürlichen, heterogenen Aquifer charakterisieren, nicht berücksichtigen (KANZ, 1977).

Dies kann nach PTAK & TEUTSCH (1994) der Grund dafür sein, daß die aus Korngrößenanalysen (Labormaßstab) abgeleiteten k_f -Werte generell kleiner sind als die von Pumpversuchen und Flowmetermessungen (Feldmaßstab) bestimmten Durchlässigkeiten.

Literatur:

- DIN 4022, 4017, 18123: Technisches Regelwerk
- BEYER (1964): Forschungsbericht
- HAZEN (1893): Forschungsbericht
- KANZ (1977): Forschungsbericht
- KÖHLER (1965): Forschungsbericht
- LANGGUTH & VOIGT (1980): Lehrbuch
- PEKDEGER & SCHULZ (1975): Forschungsbericht
- PTAK & TEUTSCH (1994): Forschungsbericht

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

E 11: Permeameterversuch

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der vertikalen Permeabilität einer Lockergesteinsprobe sowie eine Abschätzung der Porosität.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten des Versuches einschließlich der Probennahme und Auswertung betragen ca. DM 300 bis DM 1000.

Bewertung:

Die Methode liefert kostengünstig und rasch orientierende Bestimmungswerte, ist jedoch mit Unsicherheiten behaftet. Die Ergebnisse sind in heterogen aufgebauten Schichtverbänden aufgrund des kleinen Probenvolumens nicht repräsentativ.

Anwendung

Voraussetzungen:

Probenmaterial teufenorientiert.

Theorie:

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist nach DIN 4049 eine Größe, welche den Widerstand (Reibung) eines vom Fluid durchflossenen Gesteins einbezieht und von den Eigenschaften des Wassers und des Grundwasserleiters abhängt. Grundlage des Versuchsprinzips der Permeameteranalyse ist das Darcy'sche Gesetz:

$Q = kf \cdot \frac{h}{l} \cdot F = kf \cdot J \cdot F$	J	= h/l = hydraulisches Gefälle
	F	= Filterquerschnitt
	Q	= durchgeflossene Wassermenge

In die Versuchsanlage wird ein definiertes Probenvolumen eingebaut. Die meßtechnische Erfassung der Durchflußmengen und Wasserstände erlaubt anschließend die Berechnung der Durchlässigkeit sowie eine Abschätzung der Porosität.

Praxis:

Permeameterversuche erlauben die Analyse sowohl ungestörter als auch gestörter Bodenproben. Die Entnahme ungestörter Proben erfolgt durch Sonderproben aus einer Kernbohrung oder mit dem Stechzylinder nach DIN 4021. Hierbei sind Verlust von Feinkornanteil, Veränderung der Packungsdichte und des Korngefüges zu verhindern.

Bei Verwendung gestörter Proben sollte das Material vor dem Einbau mindestens 10 Sekunden lang verdichtet werden. Nach Einbau des Materials in die Versuchsapparatur werden die Proben mit Wasser gesättigt ($t \sim 24$ h).

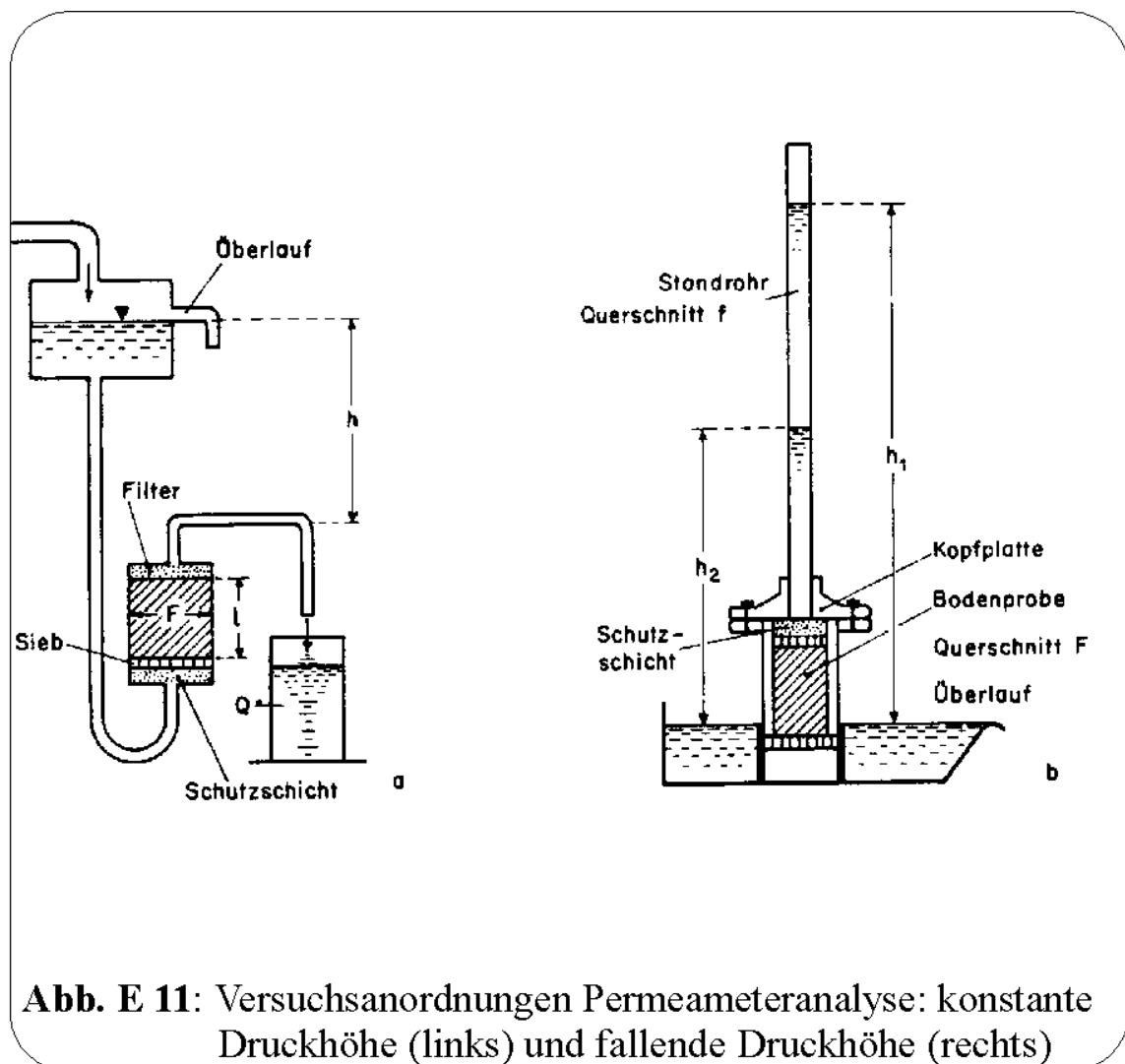


Abb. E11: Versuchsanordnungen Permeameteranalyse

Dabei ist darauf zu achten, daß Entmischungen des Materials und Umläufigkeiten vermieden werden. Erfolgt die Bestimmung der Durchlässigkeit nach DIN 18130 Teil 1, so sind zusätzlich der Wassergehalt, die Trocken-/Rohdichte und die Porenzahl e zu bestimmen. Die eigentliche Versuchsdurchführung kann in Standrohrgeräten mit konstanter/variabler Druckhöhe oder in Triaxialzellen erfolgen. Für letztere empfiehlt der Arbeitskreis "Geotechnik der Deponien und Altlasten" einen Seitendruck von etwa 0,3 bar über dem Innendruck (PRINZ, 1991).

Auswertung:

- Versuche mit konstanter Druckhöhe:

$k_f = \frac{Q \cdot l}{t \cdot F \cdot h}$	F	= Querschnittsfläche Probenkörper
	l	= Länge Filterprobe
	h	= Oberkante Filterprobe
	Q	= durchgeflossene Wassermenge
	t	= Zeit

- Versuche mit variabler Druckhöhe:

$k_f = \frac{f \cdot l}{t \cdot F} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$	F	= Querschnittsfläche Probenkörper
	l	= Länge Filterprobe
	h	= Oberkante Filterprobe
	f	= Querschnittsfläche Standrohr
	$h_{1,2}$	= Wasserstände

Die ermittelten k_f -Werte sind zusätzlich einer Temperatur-(Viskositäts-)korrektur zu unterziehen. Entsprechend der Versuchsanordnung kann die Auswertung nur Angaben zur vertikalen Durchlässigkeit liefern. Natürliche Lockergesteinsaquiferen (z.B. heterogener Talaquifer) zeigen als Folge ihrer Sedimentationsgeschichte häufig eine Horizontalschichtung. Die ermittelten Werte sind somit häufig deutlich geringer als die horizontalen Durchlässigkeiten, die dann für eine Schadstoffausbreitung relevant sind. PTAK & TEUTSCH (1994) machen derartige, in den Proben konservierte, natürliche Anisotropieeffekte zusätzlich für die hohe Ergebnisvarianz der Permeameteranalysen verantwortlich.

Literatur:

- DIN 4021, 4049, 18130: Technisches Regelwerk
- JOHNSON et. al. (1963): Forschungsbericht
- LFU Ba.-Wü. (1991): Leitfaden
- PTAK & TEUTSCH (1994): Forschungsbericht
- PRINZ (1991): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Hydraulische Methoden

Numerische Modellierung

F 1: Grundwassermodelle

Allgemeine Information

Ziel:

Beschreibung der Grundwasserströmung und der (Schad-) Stoffausbreitung im Grundwasser.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten schwanken je nach Fragestellung und Komplexität des Modells und können daher nicht im einzelnen beziffert werden.

Bewertung:

Grundwassermodelle sind eine bewährte planerische Entscheidungshilfe und ein aussagekräftiger Baustein bei der Altlastenerkundung, -bewertung und -sanierung.

Anwendung

Voraussetzungen:

Hard- und Software vorhanden, Modellierungserfahrung notwendig.

Theorie:

Grundwassermodelle werden eingeteilt in

- Strömungsmodelle
- Transportmodelle

Strömungsmodelle beschreiben die Wasserbewegung im Boden, während Transportmodelle die Verfrachtung und Vermischung von im Wasser gelösten Stoffen wiedergeben. Jedes Transportmodell hat ein Strömungsmodell als Grundlage. Physikalische Modelle von Aquifereen aufgrund der Elektroanalogie zur Potentialströmung spielen heute nur noch eine untergeordnete Rolle. In der Regel versteht man unter Grundwassermodellen mathematische Modelle.

In der numerischen Implementierung kommen unterschiedliche Lösungsmethoden zur Verwendung. Analytische Lösungen von Strömungs- und Transportgleichungen sind geschlossene Formelausdrücke und daher mit sehr geringem Aufwand berechenbar. Sie setzen allerdings Homogenität des Mediums sowie einfachste Strömungsverhältnisse und Randbedingungen voraus. Die erforderlichen Annahmen schränken die Anwendung dieser Lösungen stark ein

und geben nur eine unvollkommene Beschreibung natürlicher Verhältnisse. Für regionale Strömungsprobleme und/oder komplexe hydrogeologische Verhältnisse sind die Voraussetzungen der "analytischen" Lösung in der Regel nicht erfüllt. Deshalb müssen die entsprechenden Gleichungen numerisch gelöst werden.

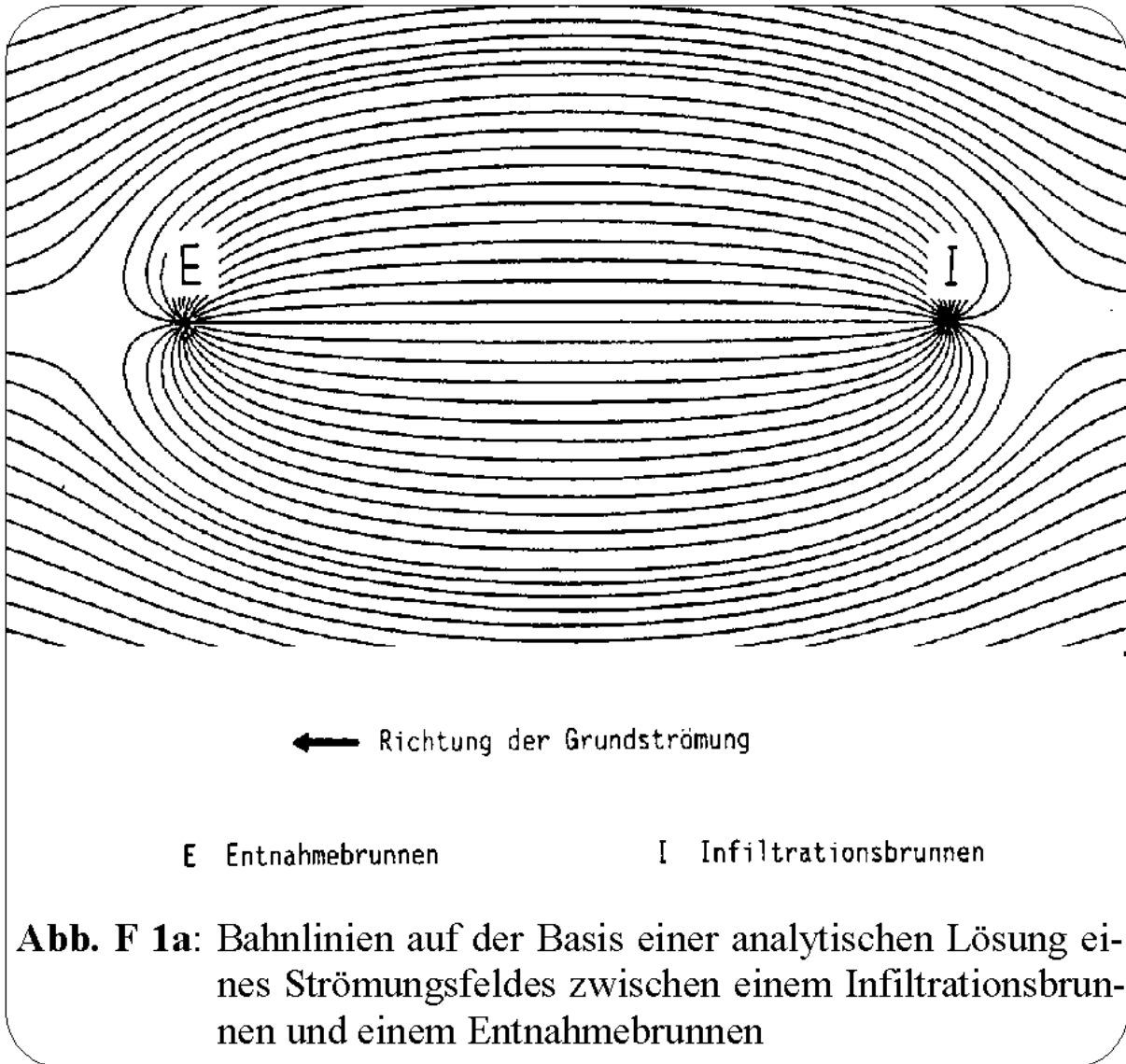


Abb. F1a: Bahnlinien auf Basis einer analytischen Lösung eines Strömungsfeldes zwischen einem Infiltrationsbrunnen und einem Entnahmebrunnen

Numerische Modelle zerlegen den Raum in homogene Teilstücke (Zellen oder Elemente). Die begrifflich einfacheren Methoden sind die Finite-Differenzen Verfahren, die den Aquifer i.allg. in rechteckige Zellen zerlegen. Sie haben den Nachteil, daß schräge oder krummlinieige Ränder nicht sehr effizient nachgebildet werden können. Flexibler sind hier die Finite - Elemente Verfahren. Speziell für die Bedürfnisse der Transportgleichung werden auch Charakteristikenverfahren und Random-Walk Verfahren eingesetzt.

Nach der Dimensionalität, d.h. der räumlichen Betrachtungsweise lassen sich 1-D, 2-D oder 3-D Modelle unterscheiden. Eindimensionale Modelle sind z.B. geeignet für die Interpretation von Säulenexperimenten. Zweidimensionale Modelle werden zur Beschreibung der regionalen

Grundwasserströmung und, mit Einschränkung, auch des Transports eingesetzt. Eine dreidimensionale Betrachtung ist z.B. bei kleinräumigen Betrachtungen im Falle von Sanierung und Transport, bei unvollkommenen Brunnen in Aquiferen großer Mächtigkeit, beim Vorhandensein mehrerer Grundwasserstockwerke, beim Auftreten von Dichteeffekten sowie für den Fall, daß die vertikalen Komponenten der Filtergeschwindigkeit in der Größenordnung der horizontalen sind, notwendig.

Nach dem zeitlichen Verhalten unterscheidet man stationäre und instationäre Modelle. Während bei stationären Modellen ein Gleichgewichtszustand betrachtet wird, wird bei instationären Modellen eine zeitliche Entwicklung diskretisiert in Zeitschritten nachvollzogen.

Praxis:

Arbeitsschritte bei der Modellierung: Aus der Problemstellung und der Verfügbarkeit der Daten folgen der Modelltyp, der Grad der Detailliertheit des Modells, seine räumliche Erstreckung und seine Diskretisierung. Eine Programmierung ist heute in der Regel nicht mehr notwendig, da zahlreiche leistungsfähige Computerprogramme zur Verfügung stehen. Eingabedaten für die Strömungsmodellierung sind:

- Verteilung der Transmissivitäten bzw. kf-Werte

bei instationärer Simulation zusätzlich noch

- Verteilung der Speicherkoeffizienten,
- Grundwasserneubildung aus Niederschlägen,
- Wasseraustausch mit Oberflächengewässern,
- Zugabe und Entnahme von Wasser aus Brunnen,
- vorgegebene Grundwasserhöhen,
- Randzuflüsse.

Die für ein Transportmodell noch zusätzlich benötigten Eingabedaten sind:

- durchflußwirksame Porosität
- Dispersivitäten
- Zugabe und Entnahme von Schadstoffen
- Zerfalls- oder Abbaukonstanten
- Adsorptionsparameter

Während die verteilten Größen der Strömungsmodelle unbekannte Funktionen darstellen, handelt es sich bei den Parametern der Transportmodelle um wenige skalare Größen.

Eine Reihe von Modellparametern ist in der Regel unbekannt. Dem Problem der unvollständigen oder unbekanntenen Aquiferdaten widmet sich die Modellkalibrierung oder Modelleichung. Dabei werden die fehlenden Daten so ergänzt, daß die Simulationsergebnisse die beobachteten möglichst gut approximieren. Die Eichung kann durch einen Prozess des sukzessiven Probierens von Hand vorgenommen werden, oder auch automatisch durch numerische Verfahren.

Die Anwendung des geeichten Modells auf Meßwerte bzw. einen gemessenen Zustand der nicht zur Eichung herangezogen wurde, wird Modellvalidierung genannt. In jedem Grundwas-

sermodell gibt es Parameter und / oder Randbedingungen, die mit mehr oder weniger starken Ungenauigkeiten / Unsicherheiten behaftet sind. Die möglichen Auswirkungen dieser Erkundungsdefizite auf das Berechnungsergebnis können im Rahmen von Sensitivitäts-/ Plausibilitätsanalysen untersucht werden. Nachdem die oben beschriebenen Schritte bei der Modellierung durchgeführt sind, erfolgt die Prognoserechnung mit dem geeichten Modell, z.B. die Untersuchung und Bewertung unterschiedlicher Handlungsalternativen.

Auswertung:

1. Strömungsmodell:

Ein Strömungsmodell stellt eine räumliche und zeitlich diskretisierte Wasserbilanz eines Gebietes dar. Das Ergebnis einer Strömungssimulation ist der zeitliche und räumliche Verlauf der Grundwasserhöhen. Strömungsmodelle werden im einzelnen eingesetzt bei der:

- Interpretation von beobachteten Grundwasserhöhen
- Bestimmung von Grundwasserbilanzen bzw. von Elementen der Grundwasserbilanz
- Vorhersage von Grundwasserabsenkung und -aufhöhung
- Ermittlung von Schutzzonen und Einzugsgebieten für Trinkwasserfassungen
- Vorbereitung von Transportberechnungen

2. Transportmodell:

Das Ergebnis einer Transportsimulation ist der zeitliche und räumliche Verlauf von Konzentrationen von im Wasser gelösten Stoffen.

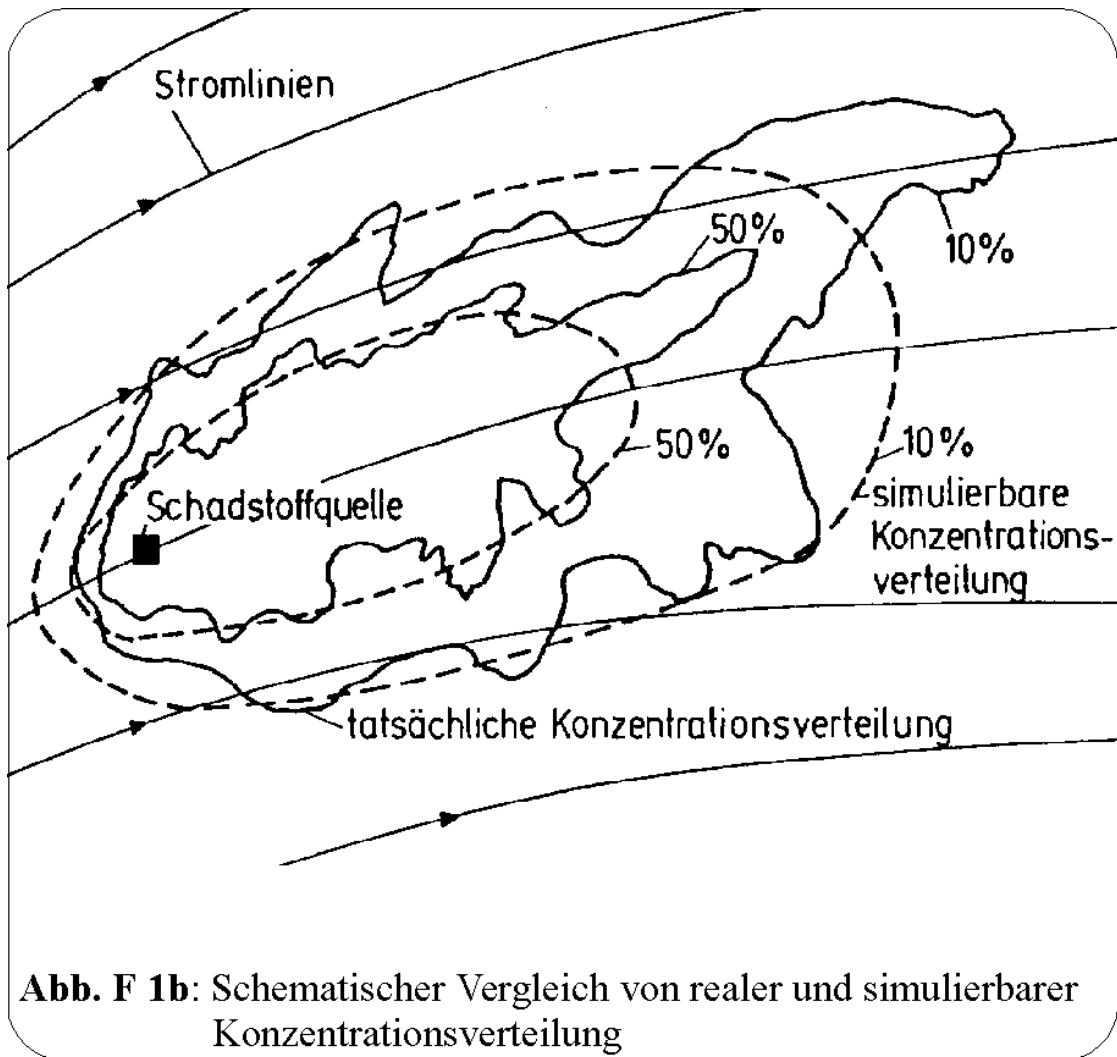


Abb. F1b: Schematischer Vergleich von realer und simulierter Konzentrationsverteilung

Transportmodelle werden eingesetzt für:

- Interpretation von Konzentrationsdaten
- Bilanzierung des Verbleibs von Schadstoffen in der Umwelt
- Vorhersage der Ausbreitung einer Verschmutzung
- Planung und Entwicklung von hydraulischen Abwehr- und Sanierungsmaßnahmen
- Planung von Erkundungs- und Überwachungsprogrammen
- Risikoabschätzung bei der Altlastenbewertung und Standortauswahl

Literatur:

- BEAR (1979): Lehrbuch
- DE MARSILY (1986): Lehrbuch
- KINZELBACH (1992): Fachbuch
- KINZELBACH & RAUSCH (1995): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Numerische Modellierung

Geophysikalische Felduntersuchungen

G 1: Geoelektrische Kartierung

Allgemeine Information

Ziel:

Festlegung von Probennahmepunkten, Aufbau des oberflächennahen Untergrundes.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten der Methode belaufen sich auf etwa DM 4000 pro Meßtag.

Bewertung:

Der Einsatz der relativ kostengünstigen Methode ist unter günstigen Voraussetzungen für die Detektion oberflächennaher Strukturen sinnvoll. Die Ergebnisse verlangen jedoch eine überaus fachgerechte Interpretation und sind im einzelnen zu verifizieren, damit sie einen Beitrag zur Erstellung des hydrogeologischen Gesamtbildes liefern können.

Anwendung

Voraussetzungen:

Keine starke Bebauung oder punktuelle Störungen wie Strom- und metallische Leitungen im Untersuchungsgebiet vorhanden, Widerstandskontraste vorhanden.

Theorie:

Die geoelektrische Kartierung zählt zur Gruppe der Gleichstromverfahren, bei denen dem Untergrund über zwei geerdete Elektroden ein elektrisches Feld aufgeprägt wird (s. G 2). Der Spannungsverlauf des Feldes im Untergrund hängt maßgeblich von der Materialeigenschaft des scheinbaren spezifischen Widerstandes $[Wm]$ ab. Dieser Mischwiderstand wird entlang der Oberfläche mit zwei Sonden gemessen. Typische Widerstandswerte/Kontraste sind (LFU Ba.-Wü., 1990):

Altlast/Deponie:	[5-50Wm]
Kiese/Sande:	[100-2000Wm]
Tone/Mergel:	[4-40Wm]

Praxis:

Es empfiehlt sich, Kartierungen mit mehreren Eindringtiefen durchzuführen. Mit dem Abstand der Meßkonfiguration läßt sich die Eindringtiefe auf das erforderliche Maß (z.B. vermutete Grundwasseroberfläche) einstellen. Als Faustregel gilt: der Abstand der Elektroden entspricht etwa der zweifachen Eindringtiefe, während der Meßpunkt- und Sondenabstand etwa so groß sein sollte wie die gewünschte Erkundungstiefe (VOGELSANG, 1993). Eine umfassende Übersicht über mögliche Meßanordnungen ist in MILITZER et al. (1986) dargestellt. Die gebräuchlichsten Meßanordnungen sind kollineare Vierpunktanordnungen, bei denen die Elektroden und Sonden entlang einer Linie stehen (Abb. G 1):

- Schlumberger-Anordnung
- Wenner-Anordnung
- Dipol-Dipol-Anordnung

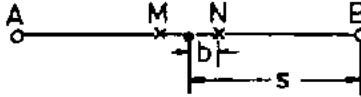
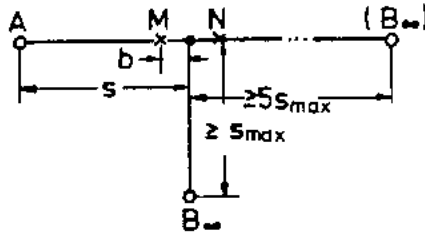
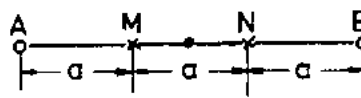
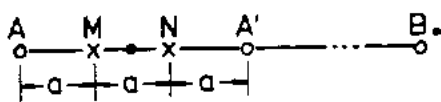
Anordnung (Kurzbezeichnung)	Geometrie — Profil A B Elektroden(o) • Meßpunkt M,N Sonden(x)	k-Faktor
Schlumberger (A-MN-B)		$\frac{\pi}{2b} (s^2 - b^2)$
Halbe Schlumberger Hummel (A-MN--B)		$\frac{\pi}{b} (s^2 - b^2)$
Wenner (AMNB)		$2\pi a$
Differenz (AMNA'--B)		$4\pi a$

Abb. G 1: Gebräuchliche Meßpunktanordnungen der geoelektrischen Kartierung

Abb. G1: Gebräuchliche Meßpunktanordnung der geoelektrischen Kartierung

Während der Durchführung wird die relative Geometrie der Anordnung nicht verändert. Der Mittelpunkt der Anordnung wandert entlang einer Profillinie über das Untersuchungsgebiet. Als geeignet haben sich Meßpunktabstände von 2 - 15 m in quadratischer Anordnung erwiesen.

Auswertung:

Die Umrechnung des scheinbaren spezifischen Widerstandes in einen für einen homogenen Halbraum gültigen Wert geschieht über einen Geometriefaktor K. Das Ergebnis der geoelektrischen Kartierung ist eine Kartierkurve, die die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes in einem festen Tiefenbereich von den Profilpunkten angibt (BDG, 1993). Die Interpretation der Kurven erfolgt entweder qualitativ oder mit Hilfe von aufwendigen Modellrechnungen. Bei mehreren durchgeführten Kartierungen entlang desselben Profils lassen sich Pseudosektionen erstellen, die eine gewisse Tiefenformation beinhalten. Die Kartierung eines Tiefenniveaus könnte Strukturen abbilden (z.B. Sedimentationskörper), die für den Schadstofftransport von Bedeutung sind. Einschränkend ist hier vor allem die mangelnde Auflösungsschärfe der Meßmethode zu nennen, z.T. verursacht durch die "Maskierung" der intermediären Widerstände.

Die Kartierung eignet sich zur Erkundung des geologischen Untergrundes der Umgebung einer Altlast, so können bei geeigneten Kontrasten z.B. Grundwasserleiter von Grundwasserstauer unterschieden werden. Durch Kartierkurven kann bei geeignetem Kontrast des scheinbaren spezifischen Widerstandes z.B die randliche Begrenzung einer Deponie/Altlast (LFU Ba.-Wü., 1990) erkannt werden.

Literatur:

- BDG (1993): Fachbuch
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MILLITZER et al. (1986): Lehrbuch
- TEUTSCH et al. (1990): Forschungsbericht
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Felduntersuchungen

G 2: Widerstandssondierung

Allgemeine Information

Ziel:

Ermittlung der Geologie im Umfeld einer Altlast, Festlegung von Probennahmepunkten, Lokalisierung einer Kontaminationsfahne im Abstrom.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten belaufen sich auf etwa DM 4000 pro Meßtag.

Bewertung:

Die Widerstandssondierung hat sich in der Abstrom- Umfelderkundung einer Altlast bewährt. Die Ergebnisse verlangen jedoch einer überaus fachgerechten Interpretation und sollten bei der Erstellung eines Gesamtbildes als ein interdisziplinär zu bewertender Lösungsbeitrag herangezogen werden.

Anwendung

Voraussetzungen:

Keine starke Bebauung oder punktuelle Störungen wie Strom- und metallische Leitungen im Untersuchungsgebiet vorhanden, Widerstandskontraste vorhanden.

Theorie:

Die geoelektrische Widerstandssondierung zählt zur Gruppe der Gleichstromverfahren, bei denen dem Untergrund über zwei geerdete Elektroden ein elektrisches Feld aufgeprägt wird (s. G 1). Das Prinzip der Widerstandssondierung besteht darin, daß die Elektrodenabstände fortlaufend variiert werden und sich so die Tiefenlage einzelner Schichten ermitteln läßt.

Bei geringen Widerstandskontrasten (z.B. Tone/Mergel an der Basis einer Deponie/Altlast) ist eine fehlerhafte vertikale Abgrenzung der Gesteinseinheiten untereinander wahrscheinlich (s. G 1), während bei hohen Kontrasten eine Überbewertung lithologisch wenig relevanter Widerstandsänderungen nicht auszuschließen ist.

Praxis:

Das Untersuchungsgebiet sollte einen homogenen, horizontal-schichtigen Aufbau besitzen, da ansonsten störende Seiteneffekte auftreten können. Die Seiteneffekte können durch eine Drehsondierung erfaßt und korrigiert werden. Bei der Widerstandssondierung wird die Schlumberger-Anordnung verwendet (Abb. G 2).

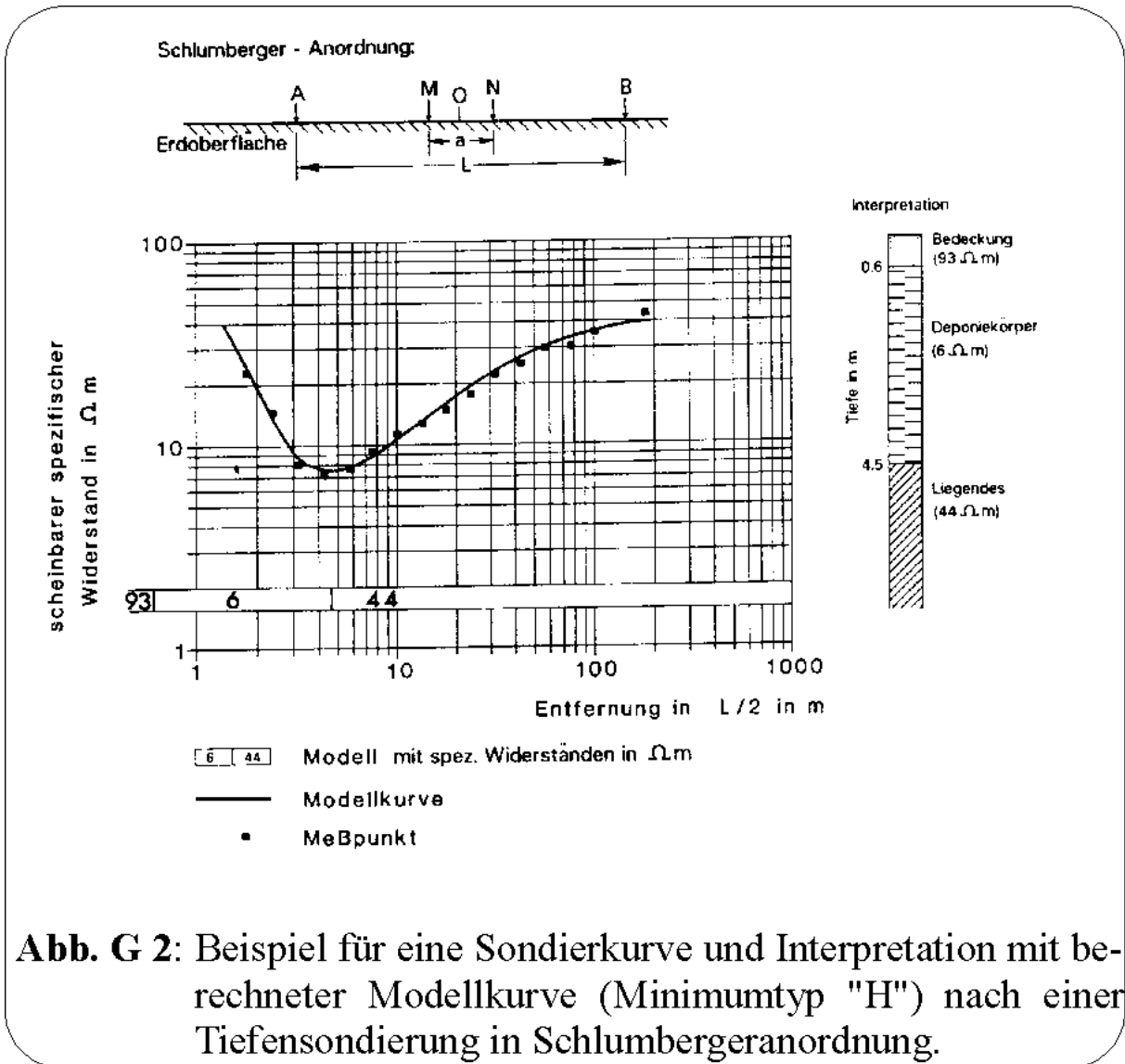


Abb. G2: Beispiel für eine Sondierkurve und Interpretation mit berechneter Modellkurve nach einer Tiefensondierung in Schlumbergeranordnung

Während der Durchführung werden die relativen Elektrodenabstände fortlaufend verändert, zur Bestimmung der Tiefenlage einzelner Schichten sind viele Einzelmessungen notwendig (LFU Ba.-Wü., 1990).

Auswertung:

Aus der Stromstärke des angelegten Feldes, der abgegriffenen Spannung und einem Geometriefaktor lassen sich die scheinbaren spezifischen Widerstände berechnen.

Diese werden als eine Funktion aller gemessenen halber Elektrodenabstände und damit der Tiefe auf doppeltlogarithmischem Papier dargestellt und zu einer Sondierungskurve verbunden.

Die Auswertung der Sondierungskurven ergibt die Anzahl der Schichten (generell Überinterpretation möglich), die Schichtmächtigkeiten und die Schichtwiderstände durch einen Vergleich mit Modellkurven oder unter Verwendung eines EDV-Programmes (z.B. INGESO).
Einschränkungen der Auswertung:

- Prinzip der Unterdrückung geringmächtiger Schichten (LFU Ba.-Wü., 1990)
- Äquivalenzprinzip der möglichen Lösungen

Die Widerstandsondierung kann bei geeigneten Kontrasten der scheinbaren spezifischen Widerstände beispielsweise Angaben zur Basisfläche einer Altlast, der Morphologie der Grundwasseroberfläche oder dem Relief eines Grundwasserstauers liefern. Eine Schadstoffausbreitung durch saline Sickerwässer kann durch ein geoelektrisches Profil im Abstrom einer Altlast dokumentiert werden. Aus dem Verhältnis der spezifischen Widerstände in der gesättigten/ungesättigten Zone läßt sich der Sättigungsgrad der Poren bestimmen. Ist aus anderen Messungen z.B. Seismik, die Porosität bekannt, läßt sich die effektive (hydraulisch wirksame) Porosität und der kf-Wert berechnen (MEIßNER et al., 1993).

Literatur:

- BDG (1993): Fachbuch
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MEIßNER et al. (1993): Forschungsbericht
- MILLITZER et al. (1986): Lehrbuch
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Felduntersuchungen

G 3: Induzierte Polarisation (IP)

Allgemeine Information

Ziel:

Festlegung von Probennahmepunkten, Ermittlung von Kontaminationsfahnen im Umfeld einer Altlast, Abschätzung hydraulischer Parameter.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für den Einsatz der Methode mit ihrem hohen meßtechnischen Aufwand belaufen sich auf etwa DM 8000 pro Meßtag.

Bewertung:

Trotz des relativ hohen meßtechnischen Aufwandes und der schwierigen Interpretation der Meßergebnisse wird durch die Bestimmung der scheinbaren Aufladefähigkeit der Kenntnisstand gegenüber den gleichstromelektrischen Verfahren erweitert. Die Induzierte Polarisation sollte diese daher bei Bedarf ergänzen.

Anwendung

Voraussetzungen:

Keine starke Bebauung, punktuelle Störungen wie Strom- und metallische Leitungen im Untersuchungsgebiet vorhanden, Polarisierbarkeit des Untergrundes.

Theorie:

Die Methode der induzierten Polarisation basiert darauf, daß sich viele Materialien wie ein elektrischer Kondensator durch einen Gleich- oder Wechselstrom aufladen (polarisieren) lassen und sich nach dem Abschalten wieder entladen. Die Erscheinung der IP beruht auf elektrochemischen Vorgängen im Untergrund:

- Galvanisch induzierte Polarisation erzeugt im Kontaktbereich leitendes Material/Elektrolyt eine starke IP-Anomalie
- Grenzschicht-(Membran-)polarisation in Zonen unterschiedlicher Ionenkonzentration erzeugt eine schwache IP-Anomalie

Die Größe des Aufladevorgangs ist je nach Material unterschiedlich frequenzabhängig und wird durch die komplexe Meßgröße "scheinbare Aufladefähigkeit" M beschrieben.

Praxis:

Bei der IP wird im allgemeinen die symmetrische Dipol-Dipol-Anordnung verwendet. Die Aussagetiefe und das Auflösungsvermögen der IP hängt von der Dipollänge und dem Dipolabstand ab. Um störende Polarisierungseffekte an den Elektroden zu vermeiden werden die Stromimpulse periodisch umgepolt. In der Abschaltzeit, die in etwa mit der Dauer der Stromimpulse übereinstimmt, erfolgt zwischen den Sonden die meßtechnische Aufnahme des sich abbauenden elektrischen Feldes (Meßbeginn ca. 10 - 30 msec nach Abschalten). Die gemessenen Abklingspannungen betragen etwa nur 1% der Primärspannung, d.h. an die Meßtechnik werden bezüglich der Auflösung weitaus höhere Anforderungen gestellt als bei der Gleichstromgeoelektrik (s. G 1, G 2). Als geeignet haben sich Meßpunktabstände von 10-20 m erwiesen.

Auswertung:

Die IP-Rohmeßdaten werden in scheinbare spezifische Widerstände und die scheinbare Aufladefähigkeit umgerechnet. Aus dem Verlauf der Abklingkurve läßt sich in Abhängigkeit von der gewählten zeitlichen Segmentierung der Messung der Abklingkoeffizient bestimmen. Diese Rechengrößen können Form und Ort der für die IP-Anomalie verantwortlichen Körper graphisch veranschaulichen (Pseudo-sektionen, 1D-, 2D- oder 3D-Modelle). Ohne eine direkte Beprobung dürfen die Ergebnisse jedoch nicht mit geologischen Profilen korreliert werden. Bei sandig-tonigen Böden besteht eine Abhängigkeit der Polarisierbarkeit von der Korngröße (OGILVY, 1972; Abb. G 3).

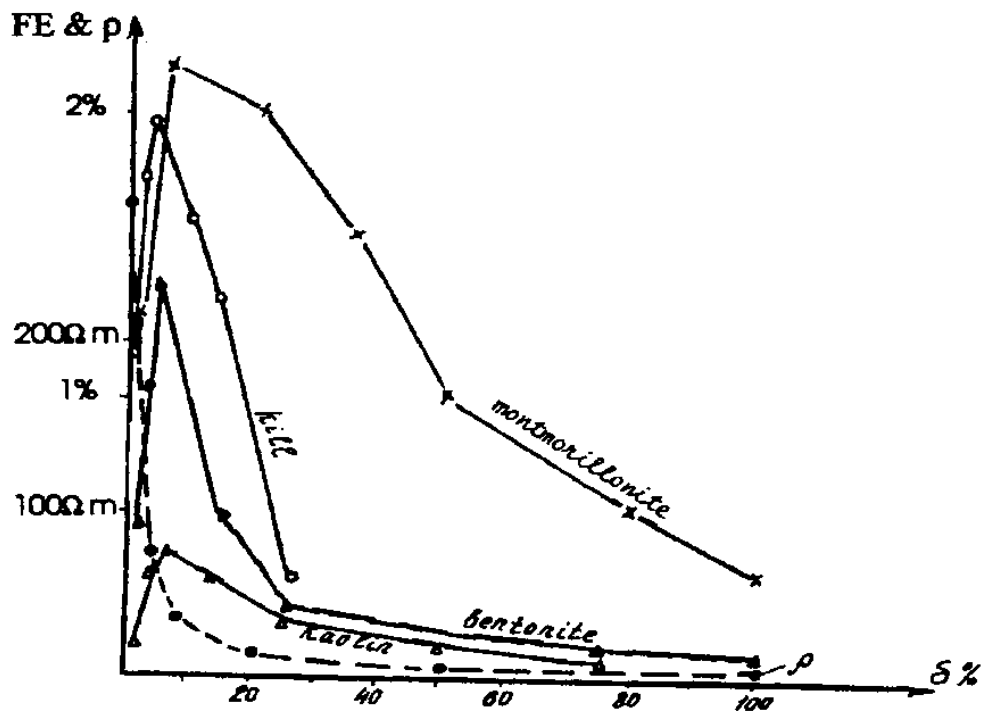


Abb. G 3: Einfluß des Tongehaltes δ eines Sandes auf den spezifischen Gleichstromwiderstand ρ . Maximale IP-Effekte werden nur in einem engen Bereich zwischen 5-10% Tongehalt beobachtet.

Abb. G3: Einfluß des Tongehaltes eines Sandes auf den spezifischen Gleichstromwiderstand

Nach BÖRNER (1994) können komplexe elektrische Parameter als potentielle Indikatoren für anthropogen bedingte Gesteinskontaminationen benutzt werden. Gleichfalls können hydraulische Transportparameter wie Durchlässigkeitsverhalten, Sorptions- und Speichervermögen aus der komplexen Niederfrequenzleitfähigkeit (< 100 Hz) geschätzt werden. Neben der Lokalisierung von polarisierbaren Einlagerungen lassen sich saline Kontaminationsfahnen im Umfeld einer Altlast ermitteln, zudem können Materialien mit ähnlichen scheinbaren spezifischen Widerständen, wie z. B. Ton und stark elektrolytbelasteter Sand deutlich unterschieden werden.

Literatur:

- BÖRNER (1994): Forschungsbericht
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MILLITZER et al. (1986): Lehrbuch
- OGILVY (1972): Forschungsbericht
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Felduntersuchungen

G 4: Eigenpotentialmethode (EP)

Allgemeine Information

Ziel:

Festlegung von Probennahmepunkten, Ermittlung von Kontaminationsfahnen im Umfeld einer Altlast, Abschätzung hydraulischer Parameter.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten hängen vom Verfahren und der Sondenanzahl ab und schwanken zwischen ca. DM 3000 und DM 5000 pro Meßtag.

Bewertung:

Trotz der relativ schwierigen Interpretation der Meßergebnisse kann die Methode bei der Abstromerkundung und zur Grundwasserlangzeitüberwachung eingesetzt werden.

Anwendung

Voraussetzungen:

Keine starke Bebauung, technische Einrichtungen und Stromleitungen (punktuelle Störungen) im Untersuchungsgebiet vorhanden.

Theorie:

Jeder künstliche Körper (z.B. Deponie, Altlast) stellt bezogen auf die Homogenität der ursprünglichen geologischen Verhältnisse und aufgrund des unterschiedlichen Chemismus einen Fremdkörper dar. Im allgemeinen treten an den Grenzflächen zwischen zwei Bereichen, die sich in ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden, elektrochemische Prozesse auf. Die in diesem Zusammenhang auftretenden Reaktionen zwischen Fremdkörper und Sediment/Sedimentgestein führen zum Freiwerden von Ionen. Aus dem Ionenfluß zwischen den beiden Körpern resultiert ein an der Erdoberfläche meßbares Potential. Die wichtigsten Prozesse, die zur Entstehung einer "Geobatterie" führen sind (BDG, 1993):

- Redox-Batterie
- Fließpotential
- Diffusionspotential
- Konzentrationsdifferenzen
- Polarisationspotentiale

Praxis:

Die Eigenpotentialmethode findet in verschiedenen Meßanordnungen ihre Anwendung, in allen Fällen erfolgt die Messung im Gelände über im Boden vergrabene, unpolarisierbare Sonden (z.B. Ag-AgCl; Cu-CuSO₄). Zur Minimierung elektrolytischer Prozesse zwischen Sonden und Boden ist ein möglichst geringer Meßstrom anzustreben, dies läßt sich nur über eine hochohmige Messung erreichen. Die Qualität der Meßdaten ist in Abhängigkeit von mehreren Faktoren zu sehen (GEUTEBRÜCK, 1992):

- Konfiguration der Meßanlage
- künstliche Störeinflüsse
- Störmeß- und Reduktionstechnik
- Auswertung selbst (Sonden, Datenübertragungstechnik, Speichermedium)

Im Gelände wird meist entlang eines Profiles in Bezug auf einen Basispunkt gemessen. Eine moderne Feldtechnik der Datenaquisition ist die flächendeckende, gleichzeitige Aufnahme von Eigenpotentialen mit mehreren Sonden eines Rasters. Mit der Methode der künstlichen Eigenpotentiale (Kurzschluß) wird eine Transformation der Redoxpotentiale im Grundwasser (Abbild des Schadstoffaustrages) als an der Erdoberfläche meßbaren Eigenpotentiale angestrebt.

Auswertung:

Bei der Interpretation ist es oft schwierig, die durch verschiedene Ursachen hervorgerufene Anomalien eindeutig voneinander zu trennen. Kontaminationsfahnen im Abstrombereich einer Deponie sind meist durch negative Anomalien gekennzeichnet (BDG, 1993; Abb. G 4).

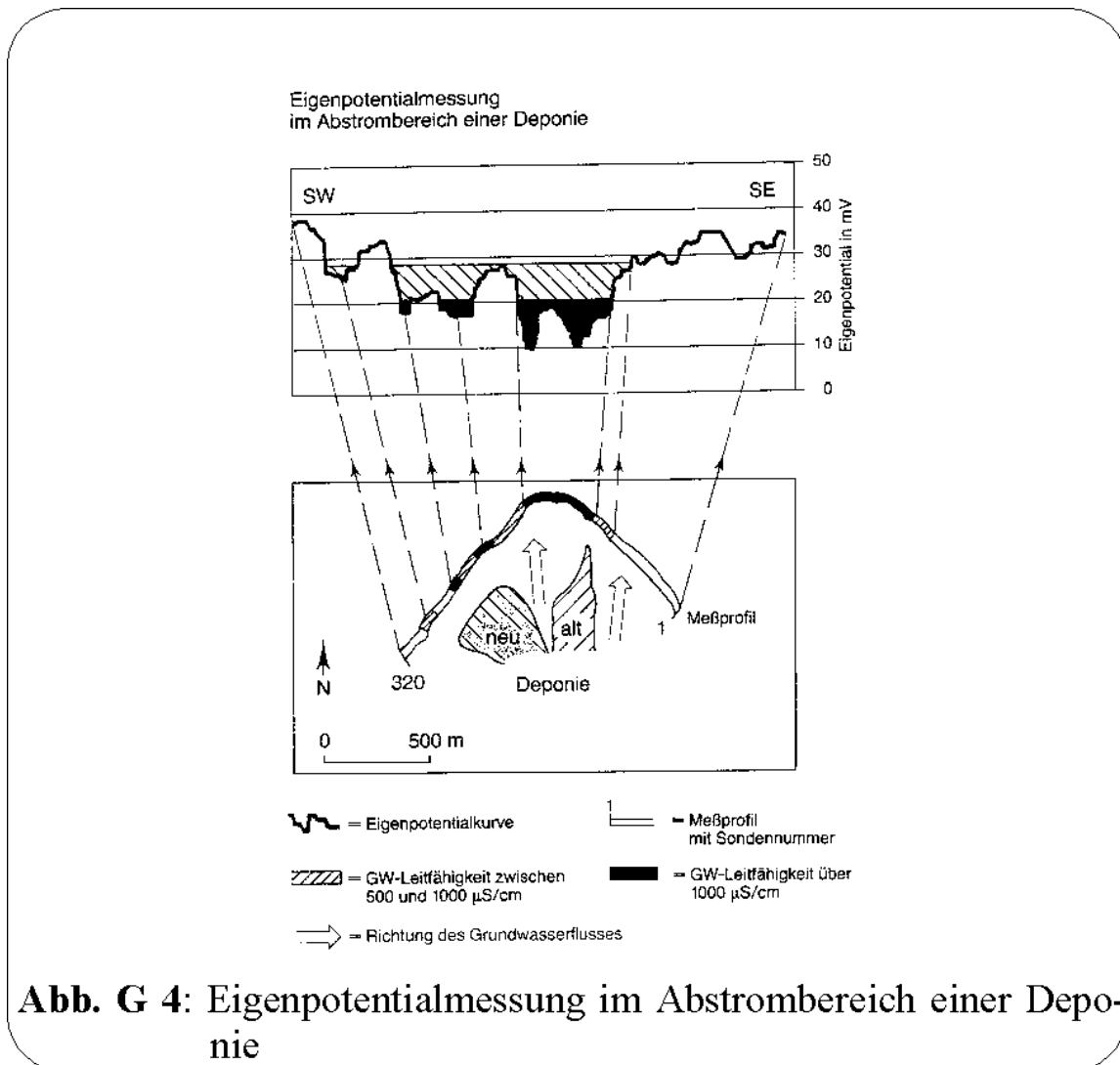


Abb. G4: Eigenpotentialmessung im Abstrombereich einer Deponie

Bei der Langzeitüberwachung des Grundwassers im Abstrombereich von Deponien mittels der Methode der künstlichen Eigenpotentiale können Beiträge zur Beantwortung von Fragen nach der Schadstoffverteilung gewonnen werden (HAAK et al., 1993). Aufgrund der Eigenpotentialanomalien über Bereichen, die mit Kohlenwasserstoffen verunreinigt sind, kann die Methode zur Optimierung von Bohrprogramme eingesetzt werden.

Literatur:

- BDG (1993): Fachbuch
- GEUTEBRÜCK (1992): Forschungsbericht
- HAAK et al. (1993): Forschungsbericht
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- VOGELANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Felduntersuchungen

G 5: Elektromagnetische Kartierung

Allgemeine Information

Ziel:

Festlegung von Probennahmepunkten, Erkundung struktureller Inhomogenitäten im Umfeld einer Altlast.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten der relativ kostengünstigen (rasche Einzelmessung) Methode belaufen sich auf etwa DM 3000 pro Meßtag.

Bewertung:

Die Methode ist zur Erkundung lateraler Inhomogenitäten im Untersuchungsgebiet ausgerüstet und eignet sich daher besonders für eine Altlastenerkundung im Karstgebiet.

Anwendung:

Voraussetzungen:

keine punktuelle Störungen wie Strom- und metallische Leitungen im Untergrund vorhanden.

Theorie:

Die elektromagnetische Kartierung zur Erkundung oberflächennaher Bodenschichten zählt zu den frequenzelektromagnetischen Verfahren (FEM). Bei den FEM wird dem Untergrund meist über eine vertikale Spule (Abstrahlung vertikal polarisierter Sinusschwingungen) ein Wechselfeld aufgeprägt, das dort über Induktion ein Sekundärfeld zur Folge hat. Dieses überlagert sich mit dem Erregerfeld (Abb. G 5). Aus der Verzerrung des Primärfeldes an der Erdoberfläche kann man auf elektrisch leitende Störkörper schließen und in Abhängigkeit von der Sendefrequenz Aussagen über die Verteilung der Bodenleitfähigkeit erlangen. Bei den FEM sind zwei Meßanordnungen zu unterscheiden:

- a) Sender und Empfänger bewegen sich in fest definiertem Abstand über das Meßgebiet
- b) Sender ist fest installiert, in dessen Fernfeld arbeitet der Empfänger (=VLF-Verfahren)

Als Vorteile des VLF-Verfahrens sind ein rascher Meßfortschritt und die Möglichkeit, bei Verwendung mehrerer Sender, eine Art multifrequente Tiefensondierung vorzunehmen, zu nennen. Nachteilig sind ein nahezu homogenes Feld (hoher Sendeabstand), das kleine, randliche Strukturen nicht immer erfassen kann.

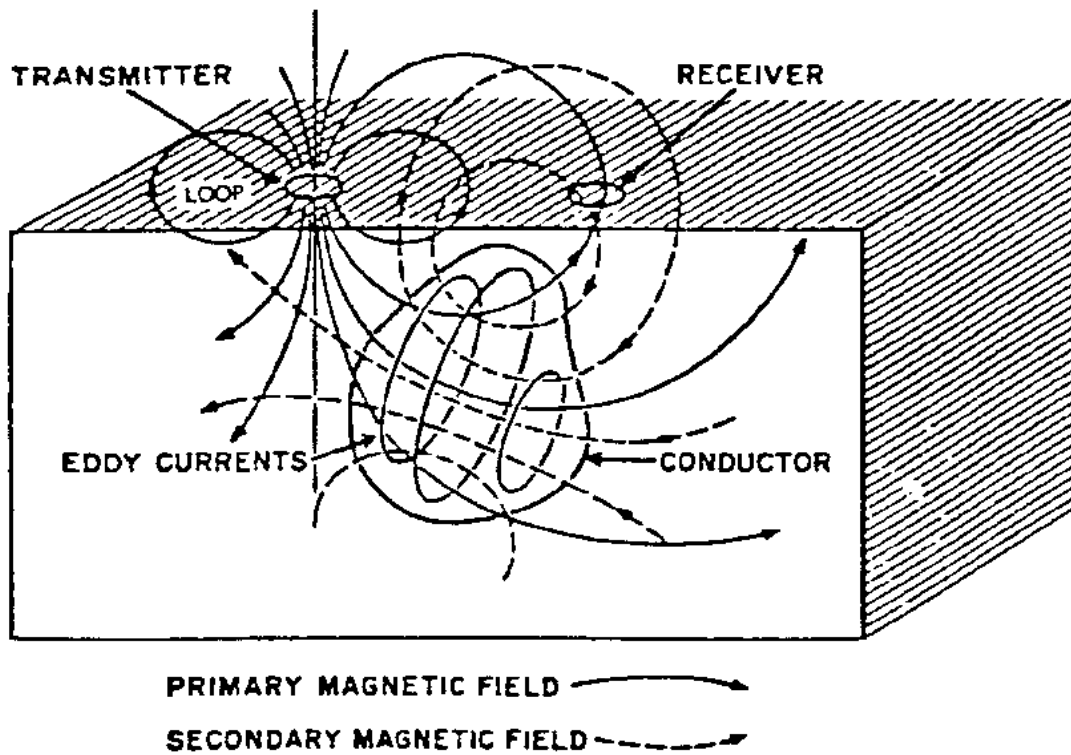


Abb. G 5: Prinzip des FEM-Induktionsmeßverfahrens

Abb. G5: Prinzip des FEM-Induktionsmeßverfahrens

Praxis:

Die Auslage der Meßanordnung richtet sich nach der Größe der zu kartierenden Strukturen und der gewünschten Eindringtiefe. Die maximale Erkundungstiefe hängt von der Meßfrequenz und dem spezifischen Gesteinswiderstand ab und liegt meist zwischen dem 0,4 - 0,8-fachen der Auslagenlänge. Der Meßpunkt, auf den sich die gemessenen Daten beziehen, liegt stets in der Mitte der Auslage. Bei Messungen im bergigen Gelände ist aufgrund einer topographieabhängigen Ergebnisverfälschung die Hangneigung zwischen zwei Meßpunkten zu bestimmen.

Einer Vergrößerung der Eindringtiefe durch eine Verminderung der Frequenz sind Grenzen gesetzt, da die Abstrahlung niederer Frequenzen einen hohen Energiebedarf bedeutet, der durch tragbare Geräte unter Feldbedingungen gedeckt werden muß. Bei den VLF-Verfahren, die von einer Person durchgeführt werden können, ist die Eindringtiefe auf 10-20 m begrenzt. Im Empfänger wird das resultierende Feld (Real- und Imaginärteil) aufgenommen, verstärkt und durch eine Kompensationsschaltung mit dem Primärfeld verglichen und kompensiert.

Auswertung:

Aus dem Rohdatenmaterial wird der regionale Gradient herausgefiltert, so daß nur noch die lokalen Anomalien der Profilmessstrecke vorliegen. Aus den Veränderungen der "In-Phase-" (0°-Phase, identisch mit Phase der Primärwelle) und der "Out-Phase-" (90°-Phase) Daten mit dem Primärfeld kann auf die Lage besonders gut oder schlecht leitender EM-Körper im Untergrund geschlossen werden (abhängig von Filterbreite).

Die mögliche Detektion steilstehender, elektrisch gut leitender Anomalien, wie z.B. Störungszonen, Verwerfungen, Spalten und Klüfte erlaubt es, mögliche Sickerwege im Umfeld einer Altlast aufzuzeigen (Karst, tektonische Bruchzonen). Die Benutzung zweier Sender, die rechtwinklig angeordnet sind, ermöglicht die Kartierung von Deponiegrenzen ("edge effect" einer asymmetrischen Anomalie).

Literatur:

- BENDER (1985): Lehrbuch
- NABIGIAN (1987): Fachbuch
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MILLITZER et al. (1986): Lehrbuch
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Felduntersuchungen

G 6: Refraktionsseismik

Allgemeine Information

Ziel:

Ermittlung der geologischen Strukturen im Untergrund zur Festlegung von Probennahmepunkten.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten der meßtechnisch relativ aufwendigen und kostenintensiven Methode belaufen sich auf etwa DM 3000 bis DM 7000 pro Meßtag.

Bewertung:

Die Refraktionsseismik erlaubt eine großflächige Erkundung des Untergrundes (Wasserwegsamkeit). Eine Profilierung verläuft ebenfalls rasch, in Kombination mit der Geoelektrik kann eine Abschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit erfolgen. Problematisch bei der Auswertung ist die mangelnde Schichtenauflösung.

Anwendung

Voraussetzungen:

keine ständigen Bodenunruhen im Untersuchungsgebiet; zunehmender, deutlicher Geschwindigkeitsunterschied der seismischen Wellen zwischen den zu trennenden Gesteinseinheiten mit der Tiefe.

Theorie:

Seismische Wellen können durch künstliche Erschütterungen an der Erdoberfläche angeregt werden und durchlaufen den Untergrund mit einer materialspezifischen Geschwindigkeit. Es gelten die Ausbreitungsprinzipien von elastischen Wellen. Treffen die angeregten Erschütterungswellen auf eine Grenzschicht, bei der sich die Wellengeschwindigkeit ändert, wird ein Teil der Wellen reflektiert, wird ein Teil der Welle gebrochen, ein anderer Teil tritt in die Schicht ein und wird von der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt. Ab einem bestimmten Einfallswinkel wird die in die Schicht eintretende Welle derart stark gebrochen, daß sie sich parallel zur Grenzschichtebene in der Schicht ausbreitet. Diesen Vorgang nennt man Refraktion (BDG, 1993). Während der Ausbreitung regen die refraktierten Wellen wiederum Wellen in der darüberliegenden Schicht an, die unter einem bestimmten Winkel nach oben laufen, dessen Größe dem Einfallswinkel entspricht. Ab dieser Distanz lassen die sich sehr schnell ausbreitenden Wellen als seismischer Ersteinsatz von den Geophonen aufzeichnen.

Praxis:

Die Messungen erfolgen entlang von Profillinien, auf denen mit einer Impulsquelle Signale erzeugt und mit Geophonen registriert werden. Die Erkundungstiefe bestimmt die Wahl der Gesamtlänge der Geophonauslage und der Abstände zwischen den Geophonen. In der Regel sollte die Länge der Geophonauslage mindestens das 5-fache der Erkundungstiefe betragen. Die Aufzeichnungen der Geophone können EDV-gestützt sofort ausgewertet werden.

Eine höhere Sicherheit über Undulationen der refraktierten Schicht wird bei Anwendung des Prinzips der Mehrfachüberdeckung gewonnen. Dabei wird der Anregungspunkt entlang der Geophonlinie mehrfach versetzt, damit an jedem Meßort hintereinander seismische Signale von verschiedenen Schußpunkten aufgenommen werden können.

Auswertung:

Aus den Empfangsignalen werden die Wellenlaufzeiten abgeleitet, das Laufzeitfeld graphisch dargestellt, die Laufzeitdaten den einzelnen Refraktoren zugeordnet und eine Regression des Laufzeitfeldes durchgeführt. Dadurch kann ein seismisches Schichtenmodell (Standard 1D-, 2D-Inversionsverfahren) berechnet werden (Abb. G 6).

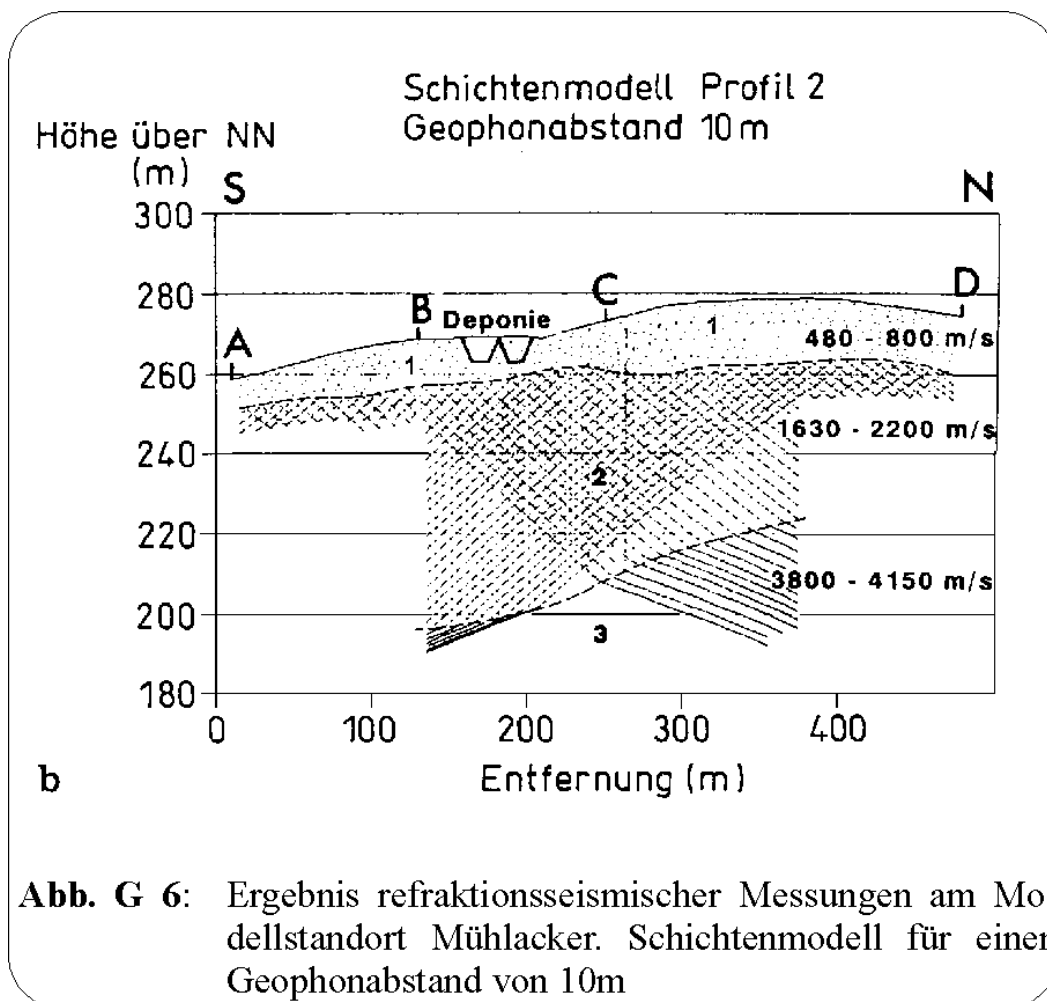


Abb. G6: Ergebnis refraktionsseismischer Messungen am Modellstandort Mühlacker

Die Methode ermöglicht eine Untersuchung des Untergrundes im Umfeld nach geologischen/hydrogeologischen Gesichtspunkten: Mächtigkeit von Lockersedimenten und deren Porosität, Mächtigkeit von Verwitterungsdecke über Festgestein, struktureller Aufbau des Aquifers, Position Grundwasseroberfläche in sandig-kiesigen Sedimenten.

Prinzipiell sind refraktionsseismische Messungen zur Erfassung einheitlich streichender Störungszonen (Wasserwegsamkeiten) im Festgestein gut geeignet. In Kombination von linien- und flächenhaften Messungen können auch unregelmäßige Störungen (z.B. Karstschlote) im Untergrund nachgewiesen werden.

Literatur:

- BDG (1993): Merkblätter
- BENDER (1985): Lehrbuch
- BRÜCKL (1990): Forschungsbericht
- GELBKE et al. (1993): Forschungsbericht
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Felduntersuchungen

G 7: Reflexionsseismik

Allgemeine Information

Ziel:

Ermittlung der geologischen Strukturen im Untergrund zur Festlegung von Probennahmepunkten.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten der meßtechnisch aufwendigen und kostenintensiven Methode belaufen sich auf etwa DM 6000 bis DM 12.000 pro Meßtag.

Bewertung:

Die Reflexionsseismik sollte zur Erkundung tiefer Strukturen des Untergrundes (z.B. in Karstgebieten) in der Umgebung einer Altlast eingesetzt werden. Unter Einsatz neuer Technologien ist auch eine wirtschaftlich vertretbare Erkundung des oberflächennahen Bereiches möglich, wengleich die elektromagnetische Kartierung mittels Protonenmagnetometer oft schneller und preiswerter Ergebnisse liefert.

Anwendung

Voraussetzungen:

keine ständigen Bodenunruhen im Untersuchungsgebiet.

Theorie:

Seismische Wellen können durch künstliche Erschütterungen an der Erdoberfläche angeregt werden. Die Kompressions- oder Scherwellen durchlaufen den Untergrund mit unterschiedlicher materialspezifischen Geschwindigkeit. Es gelten die Ausbreitungsprinzipien von elastischen Wellen (s. G 6). Im Gegensatz zur Refraktionsseismik treten Reflexionen auch dann auf, wenn an einer Schichtgrenze die Geschwindigkeit zum Liegenden abnimmt (VOGEL-SANG, 1993). In kurzer Entfernung zur Quelle werden sowohl die parallel zur Oberfläche gelaufenen Wellen, als auch die an Grenzen im Untergrund reflektierten Wellen registriert. Dadurch ist mit Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit die Bestimmung der Tiefenlage des Reflektors (Schichtgrenze) möglich (Abb. G 7).

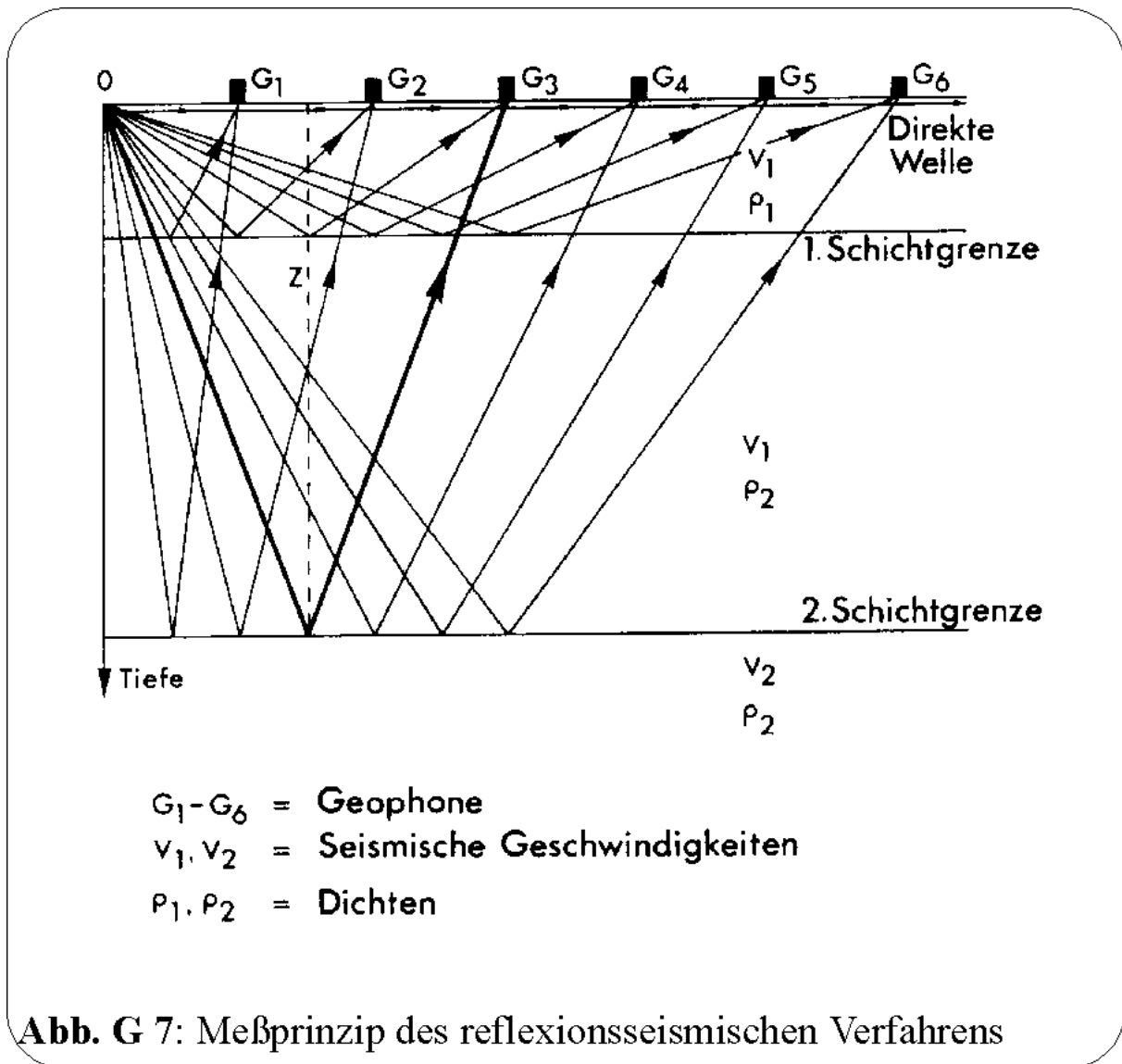


Abb. G7: Meßprinzip des reflexionsseismischen Verfahrens

Praxis:

Die Messungen erfolgen entlang von Profillinien, auf denen mit einer Impulsquelle (Hammer Schlag, Fallgewichte oder kleine Sprengladungen) Signale erzeugt und mit Geophonen registriert werden. Die Schwingungsaufnehmer sind in Abhängigkeit von der Untersuchungstiefe in Abständen von 2-20m angeordnet. Im allgemeinen liefert die Reflexionsseismik Erkenntnisse über den Aufbau des tieferen Untergrundes (ab 50m Tiefe).

Die Untersuchung oberflächennaher Bereiche ist mit o.g. niederfrequenten Anregungsquellen nicht möglich. Neue technische Entwicklungen, wie hochfrequente Luftschall- bzw. Gasdruckquellen in Verbindung mit mobilen Hochleistungsaufnehmern und einer leistungsfähigen Registratureinheit ermöglichen den Einsatz im oberflächennahen Bereich (MEIßNER et al. 1993).

Auswertung:

Bei der Auswertung von Seismogrammen müssen die Wellenzüge nach dem Ersteinsatz bestimmt werden, die von dem zu suchenden Reflektor stammen. Diese komplizierte Aufgabe erfordert einen erfahrenen Seismiker und einen größeren Aufwand bei der Bearbeitung der Daten als bei der Refraktionsseismik (s. G 6). Für die Angabe von Tiefenlagen der Reflektionshorizonte müssen die seismischen Geschwindigkeiten der Schichten bekannt sein.

Die klassische Auswertung ermöglicht das Erkennen von hydraulisch wirksamen Zonen (Zerüttungs- oder Auslaugungsbereiche) im tieferen Untergrund. Sowohl bei refraktions- als auch bei reflexionsseismischen Messungen entstehen amplitudenstarke "dispersive" Oberflächenwellen. Die Auswertung der Frequenzabhängigkeit der Oberflächenwellen führt von einer lokalen Dispersionskurve über Inversion zu einem Schichtenmodell der Scherwellengeschwindigkeit.

Dadurch ist eine laterale Abgrenzung der Altlast und die Abschätzung hydraulischer Parameter (Porosität) möglich. Unter höherem analytischen Aufwand können auch Angaben zur oberflächennahen Tiefenstrukturierung gewonnen werden. Die Meßdaten können auf ökonomische Weise unter geringen Einschränkungen bei einem regulären refraktionsseismischen Meßbetrieb mit gewonnen werden. Diese Meßkampagne erlaubt zudem den direkten Ergebnisvergleich (MEIßNER et al., 1993).

Literatur:

- BDG (1993): Merkblätter
- GELBKE et al. (1993): Forschungsbericht
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MEIßNER et al. (1993): Forschungsbericht
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Felduntersuchungen

Geophysikalische Bohrlochmessungen

H 1: Flowmeter-Log (FLOW)

Allgemeine Information

Ziel:

Erfassung der Zuflußanteile einzelner Schichten in einem vertikal gegliederten Aquifer, Identifikation von natürlichen Vertikalströmungen in Grundwassermeßstellen.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für die Messung belaufen sich auf etwa DM 5 - DM 6 pro lfm, die Kosten für Anfahrt und Einrichtung sind nicht beziffert.

Bewertung:

Die Methode identifiziert die Tiefenlage der Bereiche, aus denen einer Bohrung oder Grundwassermeßstelle Wasser zu- oder ggf. abströmt (Infiltration) und damit die hydraulisch wirksamsten Zonen für eine potentielle Schadstoffausbreitung.

Anwendung

Voraussetzungen:

Meßstelle für Unterwassermotorpumpe gangbar oder Grundwasserflurabstand < 8 m.

Theorie:

Ein Standardpumpversuch enthält keinerlei Information über die vertikale Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit. Bei einem Flowmeter-Log wird der Zufluß als eine Funktion der Tiefe bei konstanter Förderrate gemessen. Eine Ruhe - Flowmetermessung identifiziert evtl. in einer Grundwassermeßstelle bestehende Vertikalströmungen.

Praxis:

Bei den verwendeten Geräten handelt es sich meist um mechanisch-elektrische Flowmeter mit Meßflügeln. Daneben kommen auch Thermo-Flows mit deutlich geringeren Anlaufgeschwindigkeiten zum Einsatz. In der Regel wird die Flowmetermessung in der Meßstelle während Pumpbetriebs gefahren. Die Entnahmemenge und Absenkung sollten gering gehalten werden. Zur Messung wird das Flowmeter zentriert und während des Abpumpens mit konstanter Geschwindigkeit in den Brunnen eingefahren. Der sogenannte Fahreffekt muß durch eine Mes-

sung bei abgeschalteter Pumpe ("Nullfahrt") oder durch "Standardmessungen" bei fördernder Pumpe und unbewegter Sonde ermittelt werden.

Im unverrohrten Bohrloch muß zur Ermittlung der Bohrlochgeometrie zusätzlich ein Kaliber-Log (s. H 5) gefahren werden. Messungen in Bohrlöchern mit Hilfsfilterverrohrung können für den festzulegenden Ausbau einer Grundwassermeßstelle notwendig sein. Damit die einzelnen Zuflußraten in der Auswertung sicher bestimmt werden können, muß während der Messung sichergestellt sein, daß

- der Pumpeffekt größer als der Fahreffekt und
- die Fahrgeschwindigkeit doppelt so groß wie die Anlaufgeschwindigkeit des Propellers war und
- die Maximalanzeige des Flowmeters mit den verwendeten Pumpleistungen übereinstimmt.

Bei dieser Methode werden zwei Verfahren mit unterschiedlichen Erkundungsmaßstäben kombiniert. Da der Pumpversuch die Durchlässigkeit eines weit größeren Bereichs erfaßt, können entsprechend der Heterogenität des Aquifers und der Fließverhältnisse stark unterschiedliche Durchlässigkeiten erwartet werden (PTAK & TEUTSCH, 1994).

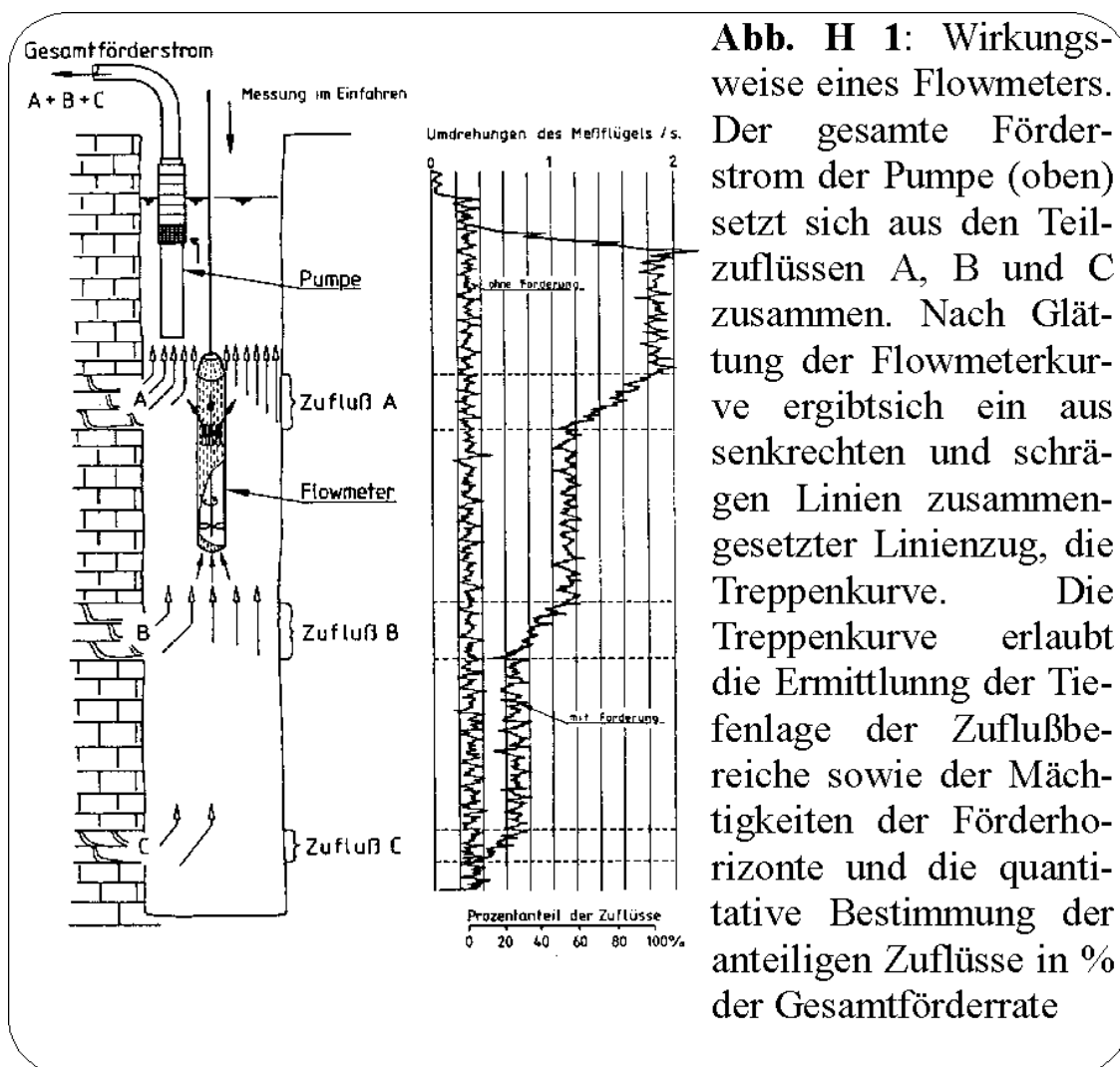


Abb. H1: Wirkungsweise eines Flowmeters

Auswertung:

Die Auswertung basiert auf der Annahme einer Horizontalschichtung in Bohrlochnähe und stationärem Zufluß. Das Ergebnis einer Flowmetermessung ist eine Art Treppenkurve zwischen der Maximalanzeige direkt unterhalb der Pumpe und einer Minimalanzeige unterhalb des letzten Zulaufes. In Bereichen, in denen die vertikale Fließgeschwindigkeit konstant bleibt, liegen keine Zuflüsse vor. Nach Glättung der Kurve und Subtraktion des Fahreffektes erfolgt die Bestimmung der vertikalen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit nach MOLZ et al. (1989).

Das Flowmeter-Log ist nicht sensitiv bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten ($< 0,5\text{cm/s}$), z.B. am Grund der Meßstelle und sehr geringen Durchlässigkeiten. In diesen Fällen können die Wasserzutritte lediglich qualitativ durch TEMP- (s. H 2) oder SAL-Logs (s. H 3) bestimmt werden, eine mengenmäßige Auswertung ist nicht möglich. Im unausgebauten Bohrloch sind die Ergebnisse aufgrund der Trübe (partikelbehaftet) des Förderwassers kritischer zu bewerten, als die Ergebnisse einer Meßfahrt in einer ausgebauten Grundwassermeßstelle.

Literatur:

- DVGW (1990): Merkblätter
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MOLZ et al. (1989): Forschungsbericht
- PTAK & TEUTSCH (1991, 1994): Forschungsbericht
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Bohrlochmessungen

H 2: Temperatur-Log (TEMP)

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der Gesteins-Grundwassertemperatur, Erkennen von Zonen mit Wasserzutritten oder -abflüssen, Temperaturschichtung eines Aquifers, u.U. Detektion von fehlerhaften Tonsperrern in Meßstellen.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für die Messung belaufen sich auf etwa DM 3 - DM 3,5 pro lfm, nicht beziffert sind die Kosten für Anfahrt und Einrichtung.

Bewertung:

Die Methode liefert die Tiefenbestimmung einzelner Zuflußhorizonte und kann in Kombination mit anderen Meßverfahren (CAL, FLOW, SAL) und hydraulischen Methoden eine Beurteilungsgrundlage für die Grundwasserdynamik eines Aquifers liefern. Die Temperaturmessung kann als Bestandteil multipler geophysikalischer Sonden für ein Grundwasser-Monitoring eingesetzt werden.

Anwendung

Voraussetzungen:

Temperaturstörungen durch Bohrung sind abgeklungen

Theorie:

Im unverrohrten Bohrloch, einer Grundwassermeßstelle bzw. Brunnen ist die in der Bohrlochflüssigkeit bzw. Grundwasser gemessene Temperatur vom geothermischen Gradienten (im Mittel 3°/100m) und unterschiedlich temperierten Zuflüssen abhängig. Wasserzuflüsse bestimmter Horizonte verursachen häufig thermische Anomalien (z.B. positiv im Nahfeld einer Ablagerung mit aktiven chemischen Zersetzungsprozessen oder biologischen Abbauprozessen) und können mittels Temperaturmessungen relativ einfach identifiziert werden.

Praxis:

Nach Abklingen der durch die Bohrung erzeugten Temperaturstörungen wird das TEMP-Log, häufig in Verbindung mit dem SAL-Log (s. H 3), zuerst gefahren. Bei größeren Bohrlochdurchmessern sind störende Konvektionsströmungen möglich. Zur Vermeidung solcher Effekte sollten Temperaturmessungen in Ruhe als auch bei Wasserförderung (Pumpbetrieb)

durchgeführt werden. Bei geringer Ergiebigkeit kann die Pumpenwärme das Ergebnis verfälschen. Bei den verwendeten Geräten handelt es sich meist um elektrische Widerstandsthermometer. Die Genauigkeit der handelsüblichen Geräte beträgt etwa $1/100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (DVGW, 1990).

Die Meßsonde wird mit konstanter Geschwindigkeit in das Bohrloch eingelassen. Die Übertragung der registrierten Meßwerte übertrage erfolgt über eine Pulsrate oder als digitales Signal. Im Meßwagen werden die angetroffenen Temperaturverhältnisse teufenabhängig (Abb. H 2) von einem Schreiber aufgezeichnet. Eine für das Gebirge repräsentative Temperatur kann im allgemeinen nur in der Bohrlochflüssigkeit gemessen werden, da im luftgefüllten Teil des Bohrlochs durch das Befahren der Sonde ein Luftaustausch mit der Atmosphäre stattfindet.

Daher wird das Eintauchen der Sonde in die Bohrlochflüssigkeit meist durch einen deutlichen Temperatursprung angezeigt.

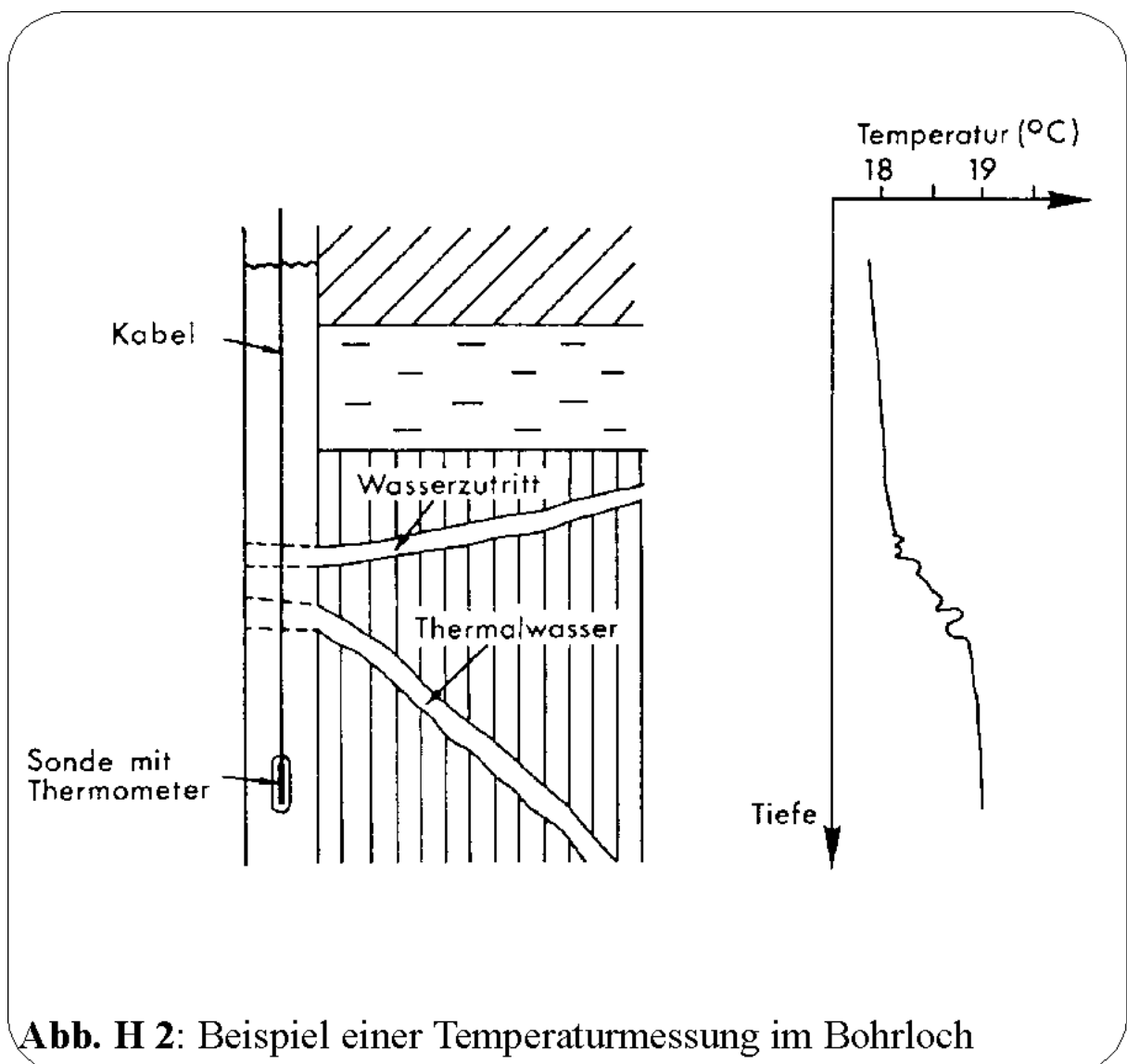


Abb. H2: Beispiel einer Temperaturmessung im Bohrloch

Auswertung:

Die Auswertung des TEMP-Logs erfolgt qualitativ. Eine Bohrlochkorrektur ist nicht erforderlich. Die gemessenen Temperaturwerte sind jedoch ab Tiefen von ~ 20 m mit dem geothermischen Tiefengradient zu korrigieren, unterhalb dieser Teufe zeigt die Temperaturkurve keine witterungsbedingten Schwankungen mehr. Temperaturwerte werden zu Korrekturzwecken anderer geophysikalischen Größen benötigt (z.B. Leitfähigkeit).

LINDNER & WAGENBRETH (1993) stellen geophysikalische Sonden vor, die eine gleichzeitige Erfassung von Temperatur, scheinbarer spezifischer Widerstand und Eigenpotential ermöglichen. Mit diesen Sonden können Meßnetze aufgebaut werden, die sich für die Erkundung einer Kontaminationsfahne im Grundwasser eignen.

Literatur:

- DVGW (1990): Merkblätter
- LINDNER & WAGENBRETH (1993): Forschungsbericht
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Bohrlochmessungen

H 3: Salinometer-Log (SAL)

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung des spezifischen Widerstandes der Bohrlochflüssigkeit, Erkennen von Zonen mit Wasserzutritten bzw. -verlusten, Meßstellenkontrolle.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten belaufen sich auf etwa DM 200 pro 100 lfm.

Bewertung:

Die Methode liefert eine Tiefenbestimmung hydraulisch wirksamer Zonen eines Aquifers und kann sehr vielseitig mit anderen Methoden kombiniert werden (z.B. simultane Bohrlochparametererfassung). Bei ausgebauten Grundwassermeßstellen können SAL-Kontrolluntersuchungen inaktive Filterbereiche bestimmen.

Anwendung

Voraussetzungen:

Elektrische Leitfähigkeitsunterschiede vorhanden

Theorie:

Für die Bearbeitung diverser hydrogeologischer Fragestellungen ist die detaillierte Kenntnis verschiedener Aquifere unerlässlich. So können durch SAL-Logs in ausgebauten Grundwassermeßstellen Wasserzutritte bzw. Wasserverluste erkannt werden, sofern diese Vorgänge mit einer charakteristischen Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit der Bohrlochflüssigkeit verbunden sind. Daneben dient eine Salinometermessung der Korrektur zur Ermittlung des wahren spezifischen Gesteinswiderstandes aus dem Elektriklog oder dem FEL-Log (DVGW, 1990).

Praxis:

Das Prinzip der Salinitätsmessungen beruht auf der Registrierung des spezifischen Widerstandes der Brunnenfüllung. Die Messung erfolgt während des Einfahrens der Sonde in das Bohrloch. Es wird hierbei eine Meßanordnung verwandt, die gegen die Einflüsse des Gebirges abgeschirmt ist. Bei größeren Bohrlochdurchmessern sind störende Konvektionsströmungen möglich. Zur Vermeidung solcher Effekte sollten Salinometer-Logs in Ruhe als auch bei Wasserförderung (Pumpbetrieb) durchgeführt werden. Bei zu großen Pumpraten findet eine

Vermischung des Wassers statt, so daß Wasserzutritte mit geringeren Leitfähigkeiten un bemerkt bleiben. Die Meßabstände der Salinometersonde sind gegenüber der 16"-64" Widerstandsonde sehr klein. Die Elektrodenanordnung ist im Inneren eines metallischen Rohres untergebracht. Die Bohrlochflüssigkeit kann während des Einfahrens durch das innen isolierte Rohr strömen. Da es sich um eine sehr kleine Elektrodenanordnung handelt, muß dafür gesorgt werden, daß der Elektroden träger stets sauber ist. Daher sollte die Salinometersonde nicht in den Bohrlochsumpf gefahren werden. Die elektrische Leitfähigkeit ist temperaturabhängig, zu Korrekturzwecken sollte stets ein Temperaturlog gefahren werden (s. H 2).

Auswertung:

Das Salinometerlog zeigt den Wasserwiderstand oder die Leitfähigkeit der Bohrlochflüssigkeit direkt an. In ausgebauten Grundwassermeßstellen können durch ein Salinometerlog u.U. Wasserzutritts- und Wasserverlustbereiche lokalisiert werden. Falls die gemessenen Widerstandswerte in Gesamtsalzgehalte umgerechnet werden sollen, ist eine Kalibrierung der Salinometersonden mit Standardlösungen im Labor notwendig.

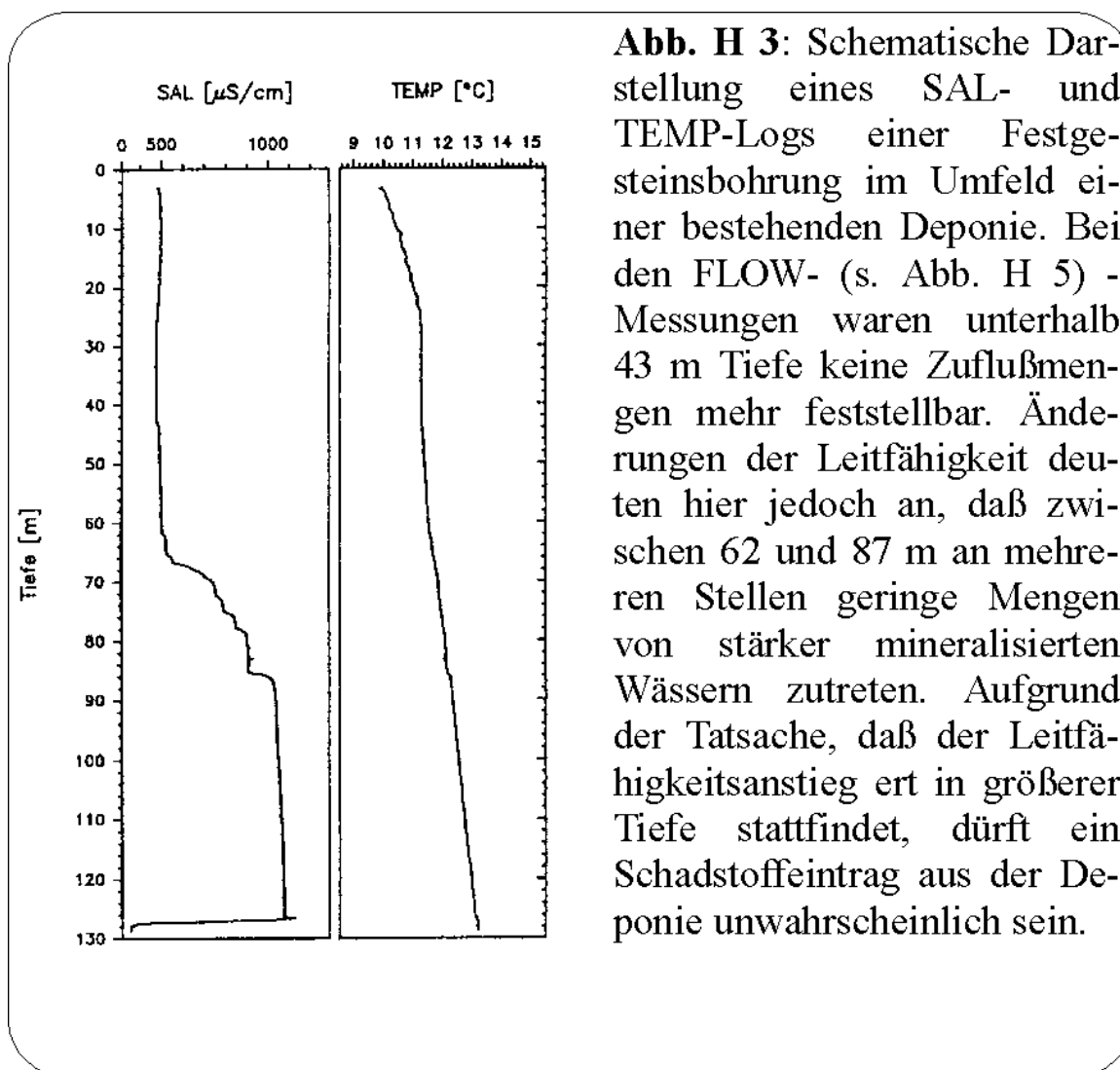


Abb. H3: Schematische Darstellung eines SAL- und TEMP-Logs einer Festgesteinsbohrung im Umfeld einer bestehenden Deponie

Weiter ist aufgrund der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit eine Korrektur notwendig. Leitfähigkeitsmessungen können auch dazu dienen, verunreinigtes Grundwasser (z.B. im Abstrom einer Altablagerung) anzuzeigen. Sie sind daher Bestandteil neu entwickelter chemischen Langzeit-Monitoringsonden, die die Parameter Druck, Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoff sowie selektiv die Aktivität ausgewählter Ionen erfassen (KOPP et al., 1993).

Literatur:

- BDG (1993): Fachbuch
- DVGW (1990): Merkblätter
- KOPP et al. (1993): Forschungsbericht
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Bohrlochmessungen

H 4: Gamma-Ray-Log (GRL)

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der lithologischen Gliederung des Untergrundes und des Tongehaltes von Sedimenten, Ausbaukontrolle von Meßstellen.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für die Messung belaufen sich auf etwa DM 3 - DM 3,5 pro lfm, nicht beziffert sind die Kosten für Anfahrt und Einrichtung.

Bewertung:

Die Methode liefert in Fragen der lithologischen Gliederung des Untergrundes, des Meßstellenausbaus und der Funktionskontrolle von Tonsperren in Grundwassermeßstellen wichtige Informationen. Die Methode ist für eine simultane Erfassung mehrerer Gesteins-Bohrlochparameter geeignet.

Anwendung

Voraussetzungen:

Eine GR-Messung wird im allgemeinen bei mehr als einer zementierten oder mehr als zwei unzementierten Stahlverrohrungen zu sehr gedämpft und ist daher nicht auswertbar. Bei Bohrlochdurchmessern $>1\text{m}$ und hohen Wasserständen im Bohrloch wird die Empfindlichkeit einer zentrierten Sonde auf nahezu Null reduziert.

Theorie:

Die verhältnismäßig schwache natürliche Gammastrahlung (Abgabe von Photonen) von Gesteinen wird zum größten Teil vom radioaktiven Isotop Kalium-40 verursacht (untergeordnet durch radioaktive Isotope aus den Uran- und Thorium-Zerfallsreihen).

Kalium ist häufiger Bestandteil von Tonmineralien. Die Messung der natürlichen Gammastrahlung erlaubt daher in der Regel, Sand und Tonschichten zu unterscheiden. In Sanden treten ebenfalls strahlungsaktive Mineralien wie Glimmer auf. In solchen Fällen können die Sande nur mit Hilfe zusätzlicher Bohrlochmessungen (s. H 6) und weiterer geologisch-mineralogischen Informationen von tonigen Sedimenten unterschieden werden.

Die Tiefenlage der für die Gliederung von süddeutschen Karbonatserien wichtigen Tonhorizonte, wie z.B. die hydrogeologisch bedeutsamen Haßmersheimer Schichten des Oberen Muchelkalks, kann durch die deutlichen Kontraste zwischen Ton- und Kalkschichten im GR-

Profil häufig sicher bestimmt werden (Abb. H 4). Daneben können Tonsperren in ausgebauten Grundwassermeßstellen lokalisiert werden (Funktionskontrolle).

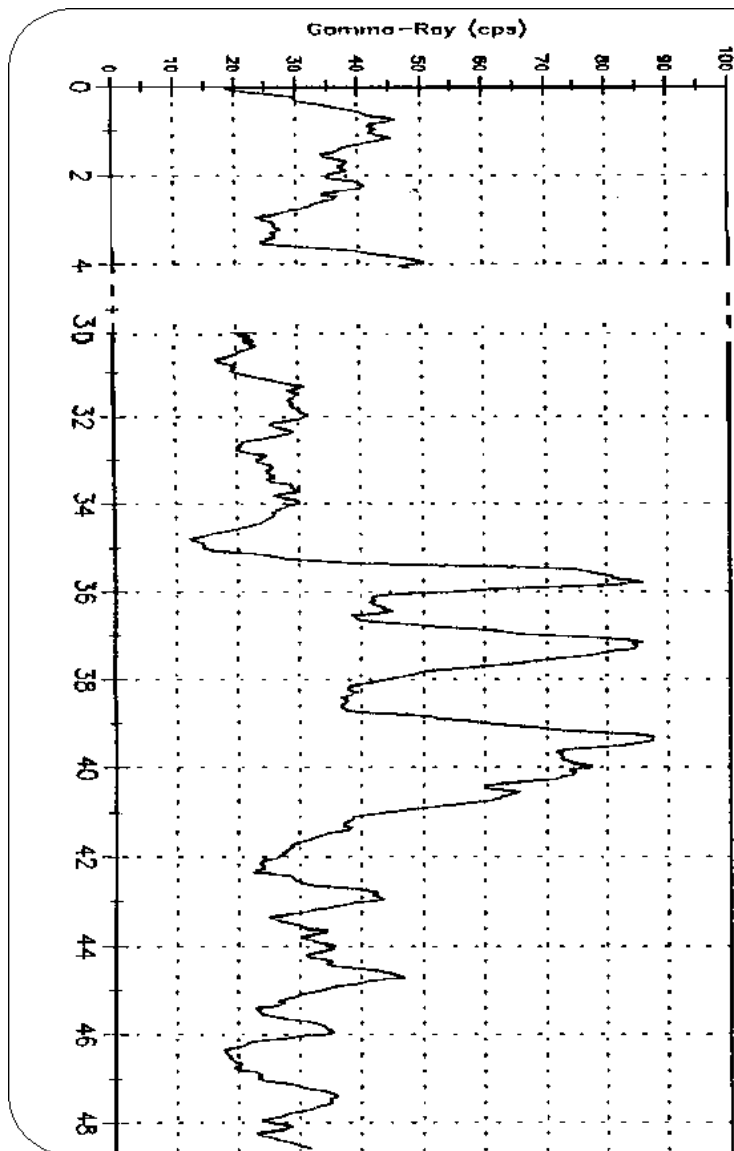


Abb. H 4:
Beispiel für ein Gamma-Ray-Log im Oberen Muschelkalk. Deutlich setzen sich die Haßmersheimer Schichten in einer Tiefe von ca. 35m bis ca. 42m mit drei Signalen in der Stärke von 80-90 cps vom Signal der hangenden und liegenden Kalkschichten mit 20-40 cps ab.

Abb. H4: Beispiel für einen Gamma-Ray-Log im Oberen Muschelkalk

Praxis:

Die natürliche Gammastrahlung kann mit einem Geiger-Müller-Zähler oder einem heute allgemein üblichen Szintillationszähler im offenen Bohrloch oder einer ausgebauten Grundwassermeßstelle (Korrekturen notwendig) erfaßt werden. Hierzu wird die Meßsonde mit einer konstanten Geschwindigkeit in das Bohrloch eingelassen. In Abhängigkeit von der Fahrtgeschwindigkeit und der Zählrate sollte eine Auflösung 0,3m-0,5m erreicht werden. Das Meßsignal (Impulsrate in cps counts per seconds) ist nach DVGW (1990) abhängig von:

- Radioaktivität der umgebenden Gesteinsformation
- Größe des Szintillationskristalls (bestimmt Empfindlichkeit der Meßsonde und legt damit Statistikniveau der Zählrate fest)
- Bohrlochdurchmesser, Art der Bohrspülung
- Art und Stärke der Verrohrung
- Position der Sonde im Bohrloch (Zentrierung)

Diese Daten sind im Meßprotokoll aufzuführen.

Auswertung:

Aus den oben genannten Unsicherheitsfaktoren erfolgt die Auswertung eines GRL vorwiegend qualitativ. Eine quantitative Auswertung der Gammakurve bezüglich der Radioaktivität des Gesteins setzt eine Kallibrierung der Meßeinrichtung nach dem API-Standard und die Kenntnis der Bohrlochgeometrie voraus. Die Meßwertverarbeitung umfaßt hauptsächlich zwei Aufgaben (MILLITZER et al., 1986):

- Festlegung der Schichtgrenzen (Halbwertstiefe als Kurvenindikator)
- Ermittlung der schichtspezifischen Intensität (Bohrlochkorrektur notwendig)

Bei einer deutlichen Ton-Sand-Wechselfolge kann für Schichten > 1m mächtig der Tongehalt, bzw. der Ton-Schluffgehalt überschlägig aus der GR-Kurve bestimmt werden. Tonsteine und zirkon- bzw. glaukonitführende Feinsande können nicht unterschieden werden (DVGW, 1990).

Literatur:

- BDG (1985): Seminarband
- DVGW (1990): Merkblätter
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MILLITZER et al. (1986): Lehrbuch
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Bohrlochmessungen

H 5: Kaliber-Log (CAL)

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung der Bohrlochgeometrie.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten belaufen sich auf etwa DM 2 - DM 2,5 pro lfm, die Kosten für Anfahrt und Einrichtung sind nicht beziffert.

Bewertung:

Die Methode liefert die für alle wesentlichen geophysikalischen Bohrlochmessungen notwendigen Daten zur Bohrlochgeometrie. Ein weiterer Vorteil sind die zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Meßverfahren (simultane Erfassung mehrerer Gesteins-Bohrlochparameter).

Anwendung

Voraussetzungen:

Bohrloch standfest und gangbar, Anpreßdruck der Federarme stets für einwandfreie Zentrierung ausreichend.

Theorie:

Eine Kalibermessung wird in den meisten Fällen durchgeführt, um den Einfluß des Bohrlochs auf andere Meßgrößen zu bestimmen. Die kontinuierliche Aufzeichnung des Bohrlochdurchmessers mit der Tiefe gibt Auskunft über Abweichungen vom Sollwert (Meißeldurchmesser).

Praxis:

Das üblicherweise benutzte Kalibergerät für allgemeine Fragestellungen ist ein Schirmkaliber mit drei Federarmen. Alle Kalibergeräte werden in geschlossenem Zustand in die Bohrung eingefahren und am untersten Punkt der zu vermessenden Strecke motorisch geöffnet. Die Sonde tastet mit ihren Federarmen, die je nach Bohrlochdurchmesser unterschiedlich stark gespreizt werden, die Bohrlochwand ab. Die Auslenkung wird von einem Präzessionspotentiometer aufgenommen und als eine Pulsrate über das Meßkabel zur Oberflächeneinheit übertragen. Dort erfolgt über einen Schreiber die tiefenabhängige Registrierung. Das Anwendungsspektrum der Kalibermessung ist sehr weit:

- Bohrlochkorrekturen sind bei nahezu allen bohrlochgeophysikalischen Meßverfahren notwendig
- im Kombinationseinsatz mit anderen Meßverfahren dient die Kalibermessung häufig als Zentriereinrichtung für die Meßsonden
- Lokalisierung von größeren Schadenstellen in ausgebauten Grundwassermeßstellen
- Kontrolle von Verfüllungs- und Zementationsarbeiten sowie beim Absetzen von Verrohrungen.
- Identifikation von Kluftbereichen Verkarstungsabschnitten in einer Bohrstrecke (Kaliberausbrüche)
- Identifikation von Bohrlochverengungen durch quellende Tone, starker Filterkuchenbildung sowie Zusinterung.

Bei zu geringem Anpreßdruck der Federarme und einer geneigten Bohrung kann es dazu kommen, daß sich das Kalibergerät nicht einwandfrei zentriert. Schrägbohrungen können mit den üblichen Kalibergeräten nicht vermessen werden, hierzu sind Spezialausrüstungen erforderlich.

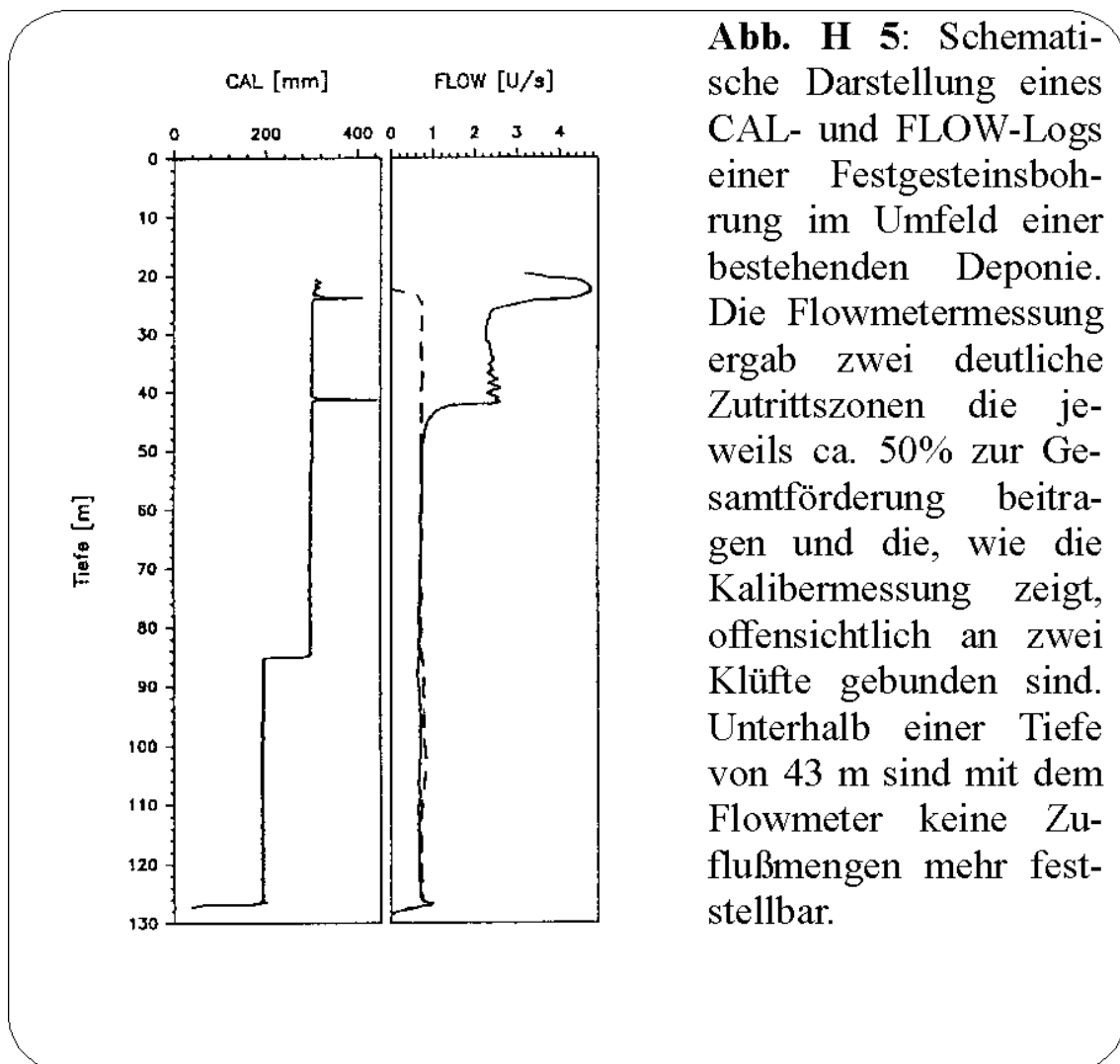


Abb. H 5: Schematische Darstellung eines CAL- und FLOW-Logs einer Festgesteinsbohrung im Umfeld einer bestehenden Deponie. Die Flowmetermessung ergab zwei deutliche Zutrittszonen die jeweils ca. 50% zur Gesamtförderung beitragen und die, wie die Kalibermessung zeigt, offensichtlich an zwei Klüfte gebunden sind. Unterhalb einer Tiefe von 43 m sind mit dem Flowmeter keine Zuflußmengen mehr feststellbar.

Abb. H5: Schematische Darstellung eines CAL- und FLOW-Logs einer Festgesteinsbohrung im Umfeld einer bestehenden Deponie

Auswertung:

Der gemessene Bohrloch- oder Brunnendurchmesser kann dem Log direkt entnommen werden. Als Zusatzinformation wird in der Regel mit allen Kalibern eine Integration des Bohrlochvolumens durchgeführt.

Literatur:

- BDG (1985): Seminarband
- DVGW (1990): Merkblätter
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MILLITZER et al. (1986): Lehrbuch
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Bohrlochmessungen

H 6: Elektrik-Log (EL, FEL)

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung des spezifischen elektrischen Gesteinswiderstandes, lithologischer Gebirgsaufbau, Ausbaukontrolle von Meßstellen.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten belaufen sich auf etwa DM 5 - DM 6 pro lfm, die Kosten für Anfahrt und Einrichtung sind nicht beziffert.

Bewertung:

Die Elektrik-Logs erlauben in Kombination mit anderen Methoden die technische Kontrolle von ausgebauten Grundwassermeßstellen, dienen der Untergrunderkundung im Locker- und Festgestein (Aufbau, Klüftigkeit) und können darüberhinaus in Fragen der Wasserqualität von Lockergesteinen eingesetzt werden (LFU Ba.-Wü., 1990).

Anwendung

Voraussetzungen:

offenes Bohrloch zur Ermittlung des Gesteinswiderstandes.

Theorie:

Zur Messung des spezifischen Gebirgs-widerstandes werden zwei unterschiedliche Meßverfahren verwendet. Bei der Messung in Mehrpunktanordnung (EL) wird über zwei Elektroden ein konstanter Strom in das Gebirge geleitet. Über zwei weitere Elektroden (davon in der Regel eine im Bohrloch und eine an der Erdoberfläche) wird die Spannung gemessen, die proportional zum Widerstand des Gebirges ist.

Bei der anderen Methode (FEL= Fokussiertes Elektro-Log) wird der elektrische Widerstand zwischen einer auf der Sonde befindlichen Meßelektrode und einer Referenzelektrode (entweder einige Meter darüber an einem Meßkabel oder an der Erdoberfläche) gemessen.

Zusätzlich sind oberhalb und unterhalb der Meßelektrode längere Zusatzelektroden an der Sonde angebracht, die den Stromfluß fokussieren. Hierdurch wird eine größere seitliche Eindringtiefe und bessere vertikale Schichtenauflösung erreicht (u.a. MILLITZER, et al., 1986).

Praxis:

Die Stromeinspeisung und der Spannungsabgriff erfolgen von den an der Sonde angebrachten Elektroden meist galvanisch über die Spülung (Ausnahme Mikrologs).

Das dabei zwischen zwei Spannungselektroden anfallende Signal ist dem spezifischen Widerstand proportional und wird auf einem Schreiber fortlaufend registriert. Standardmäßig wird mit zwei verschiedenen Elektrodenentfernungen gemessen (16"-64"-Normalen).

Die Anwendungsbereiche der verschiedenen Widerstandsverfahren werden durch das Verhältnis von wahren Gebirgs- und Spülungswiderstand R_t/R_m bestimmt (s. DVWG, 1990). Die Elektrik-Logs besitzen ein weites Einsatzspektrum:

- vertikale Auflösung einer Schichtfolge
- Kluftdetektion in Festgesteinen
- Überprüfung von Kunststoffausbaurohren
 - Lage der Filter und Vollrohre
 - Position von Undichtigkeiten (Korrosion)
- Bestandteil geophysikalischer Sonden

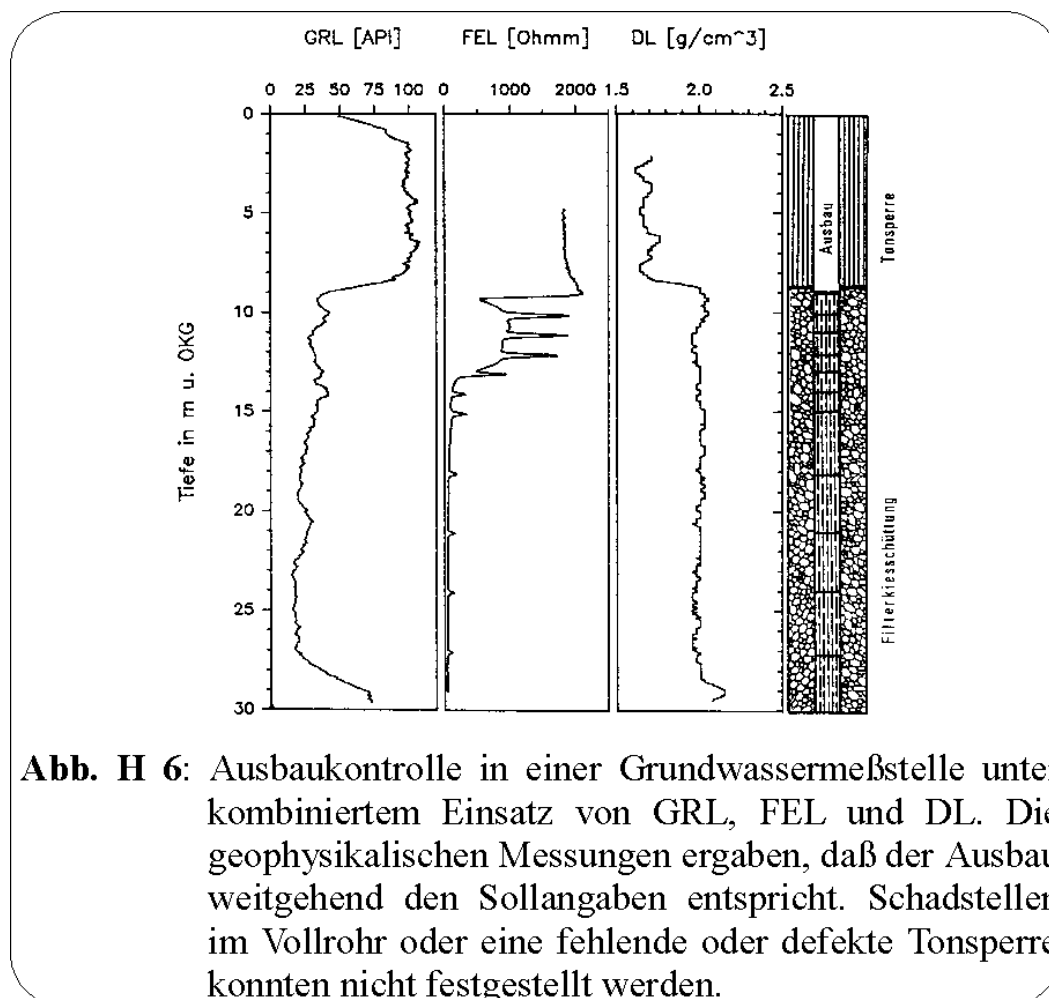


Abb. H6: Ausbaurückmeldung in einer Grundwassermeßstelle unter kombiniertem Einsatz von GRL, FEL und DL

Auswertung:

Die Kurven der Elektrik-Logs können qualitativ aus dem Diagramm interpretiert werden. Für die Ermittlung des wahren spezifischen Widerstandes aus dem gemessenen Scheinwiderstand (=Mischwiderstand) muß der Spülungswiderstand und der Bohrlochdurchmesser bekannt sein.

Fokussierte Elektrologs sind auch für die Kluftdetektion in Festgesteinen geeignet, allerdings lassen sich nicht so hohe Widerstände messen wie bei der 40cm- und 160cm-Anordnung (VOGELSANG, 1993).

Neben internen Störfaktoren der Meßapparatur (z.B. analoge Signalübertragung) beeinflußt die Infiltration der Spülung von Versuchs- und Ausbaubohrungen in das Formationswasser die Interpretation des Meßergebnisses, sofern nicht ein Mikrolatero-Log gefahren wurde, um den Widerstand der gefluteten Zone zu bestimmen.

Literatur:

- BDG (1993): Fachbuch
- DVGW (1990): Merkblätter
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MILLITZER et al. (1986): Lehrbuch
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Bohrlochmessungen

H 7: "Porositätsabhängige" Verfahren (D, FD; N; SV)

Allgemeine Information

Ziel:

Bestimmung von zusätzlichen lithologischen Parametern des Untergrundes wie Porosität, Klüftigkeit und Gesteinsdichte.

Kosten/Aufwand:

Die Kosten für die Messung belaufen sich auf etwa DM 3 - DM 3,5 pro lfm je eingesetztem Verfahren, die Kosten für Anfahrt und Einrichtung sind nicht beziffert.

Bewertung:

Die Methoden sind variabel und mit anderen Verfahren kombinierbar (Ausnahme: Sonic Log). In Spezialfällen der Erkundung können somit weitere lithologische Parameter ermittelt werden, mittels derer man potentielle Schadstoffausbreitungswegsamkeiten identifizieren kann.

Anwendung

Voraussetzungen:

Bei Neutronenmessung Sicherheitsvorschriften beachten; bei Sonic Logs müssen Schallgeschwindigkeiten der Gesteinsmatrix und der Porenflüssigkeit bekannt sein.

Theorie:

In Erkundungs- oder Überwachungsprogrammen kann es in Abhängigkeit von den geologischen Rahmenbedingungen (z.B. tektonisch überprägte Verbände, Karst, Salinarfolgen) notwendig sein, über den Rahmen der standardmäßig gefahrenen bohrlochgeophysikalischen Verfahren hinaus (vgl. H 1- H 6), weitere Untersuchungen zur Ermittlung von Untergrundparametern wie z.B. Gebirgsaufbau, Porosität und Klüftigkeit durchzuführen.

Hierzu können die Verfahren der **Dichtemessung** (D, FD), der **Neutronenmessung** (N) und die Messung der Schallgeschwindigkeit in **Sonic Logs** (SV), auch als "porositätsabhängige" Verfahren bezeichnet, herangezogen werden.

Praxis:

Die Dichtemessung und die Neutronenmessung sind radioaktive Verfahren, bei denen Gammastrahlung in das Gebirge ausgesendet wird. Entsprechend sind beim Einsatz vor Ort

spezielle Sicherheitsvorschriften zu beachten. Beide Verfahren sind zudem durchmesserabhängig, zur Bohrlochkorrektur ist ein CAL (s. H 5) erforderlich.

Bei der Dichtemessung wird die Impulsrate der aufgrund eines künstlichen Neutronenbeschusses (Quelle: ^{137}Cs) einfallenden Gammarrückstrahlung gemessen. Die Anordnung Gammaquelle - Bleiabschirmung - Detektor muß linear sein.

Bei der Neutronenmessung werden von einer Quelle (meist Am-Be) schnelle Neutronen ausgesendet und die Impulsrate der einfallenden Sekundärgamma- bzw. thermischen Neutronenstrahlung gemessen. Beim Sonic Log wird die Laufzeit des Schalls im Gebirge fortlaufend aufgezeichnet.

Auswertung:

Die Neutronenmessung ist ein direktes Verfahren zur Bestimmung der Festgesteinsporosität. Das Verfahren hängt hauptsächlich vom Wasserstoffgehalt in der Umgebung der Sonde ab, und ist daher nach Berücksichtigung diverser Störgrößen (Durchmesser, Spülung, Filterkuchen, Verrohrung, Exzentrizität der Sonde) ein gutes Maß für die Gesteinsporosität.

In der Auswertung der Dichtemessung wird die Porosität (Fest- und Lockergestein) indirekt aus der Zählrate ermittelt. Die Ergebnisse sind jedoch nur brauchbar, wenn der Korngrößenanteil $<0,002$ mm (DIN 4022) vernachlässigbar klein oder Null ist. Das Verfahren ist auch zum Erkennen von Kluft- und Zerrüttungszonen im Festgestein und zur Funktionskontrolle von Kiesschüttungen in der Grundwassermeßstelle geeignet.

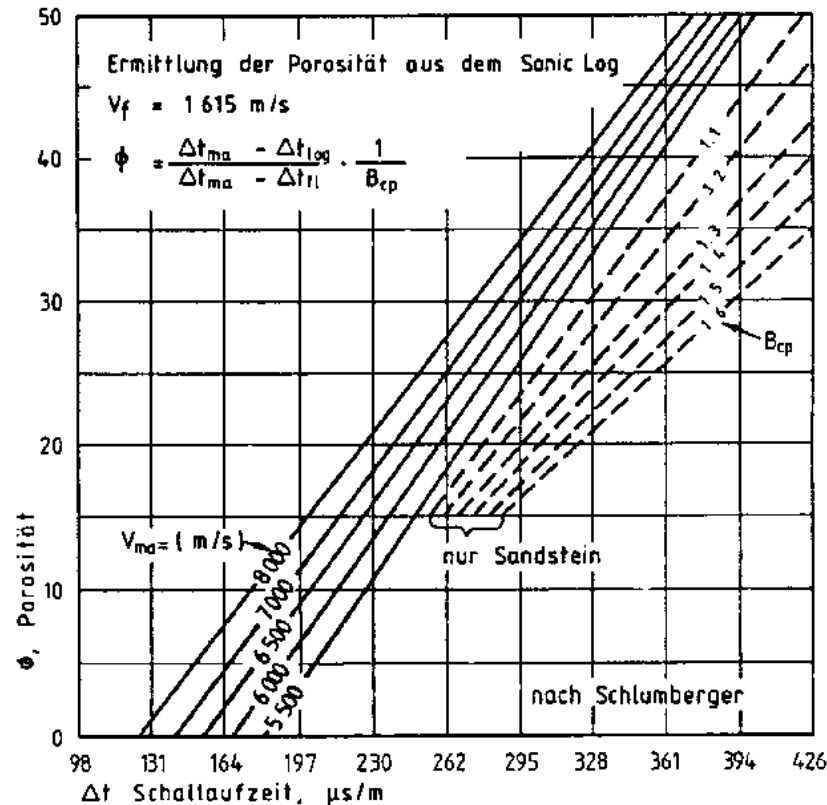


Abb. H 7: Beispiel für eine Ermittlung der Porosität aus dem Sonic-Log (SV)

Abb. H7: Beispiel für eine Ermittlung der Porosität aus dem Sonic-Log (SV)

Mit dem Sonic Log kann die Festgesteinsporosität (Abb. H 7) indirekt unter Hinzuziehung weiterer Parameter bestimmt werden (DVGW, 1990). Das Sonic Log ist für die Identifikation von Kluft- und Zerrüttungszonen im Festgestein geeignet. Die Meßergebnisse sind weiter wichtig für die Kallibrierung refraktions- und reflexionsseismischer Messungen an der Erdoberfläche.

Literatur:

- BDG (1985): Seminarband
- DVGW (1990): Fachbuch
- LFU Ba.-Wü. (1990): Handbuch
- MILLITZER et al. (1986): Lehrbuch
- VOGELSANG (1993): Lehrbuch

Ausführliche Literaturverweise in Kapitel: Literatur: Geophysikalische Bohrlochmessungen

Literaturverzeichnis

Literatur: Auswertung vorhandener Information

DODT, J. (1987a):

Die Verwendung von Karten und Luftbildern bei der Ermittlung von Altlasten. Ein Leitfaden für die praktische Arbeit. - Teil 1: Text, Teil 2: Kartenbeilagen; Düsseldorf.

DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (Hrsg., 1989):

Stofftransport im Grundwasser; DVWK Schriften 83; 296 S.; Bonn.

GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg., 1994):

Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen. - Informationen 6, 114 S.; Freiburg.

GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg., 1985):

Grundwasserlandschaften Baden-Württemberg. - Sonderveröffentlichungen, 12 S.; Freiburg.

GEYER, U. & GWINNER M. P. (1991):

Geologie von Baden-Württemberg. - 4. Aufl., 482 S.; Stuttgart.

KINNER, U. H., KÖTTER, L. & NIKLAUSS, M. (1986):

Branchentypische Inventarisierung von Bodenkontaminationen - ein erster Schritt zur Gefährdungsabschätzung für ehemalige Betriebsgelände. - Texte des Umweltbundesamtes, 627 S; Berlin.

KRONENBERG, P. (1984):

Photogeologie. Eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der geologischen Auswertung von Luftbildern. - 268 S.; Stuttgart.

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG/ LFU (1992):

Handbuch Historische Erhebung altlastverdächtiger Flächen. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 9; Karlsruhe.

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG / LFU (1993):

Branchenkatalog. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 3, 2. erw. Auflage; Karlsruhe.

MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG & LANDWIRTSCHAFT DES LANDES

NRW; LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NRW (Hrsg., 1991):

Leitfaden zur Grundwassererkundung in Festgesteinen bei Altablagerungen und Altstandorten. - 173 S.; Düsseldorf.

REUL, K. (1972):

Anwendung der Luftbildgeologie bei der Grundwassererschließung. - Wassergewinnung, Wassergüte: S. 50 - 57; Frankfurt.

STETS, J. (1992):

Geologie und Luftbild. - Clausthaler Tektonische Hefte, 21, 3. Aufl.; 175 S.; Clausthal - Zellerfeld.

Literatur: Erstellung von Probennahmepunkten

- BIESKE, E. (1992):
Bohrbrunnen. - 7. Aufl., 417 S.; München.
- BIESKE, E. & WANDT, K. (1977):
Nold - Brunnenfilterbuch. 314 S.; Stockstadt.
- BERUFSVERBAND DEUTSCHER GEOLOGEN; GEOPHYSIKER UND MINERALOGEN (Hrsg., 1991):
Katalog geowissenschaftlicher Software. - Arbeitskreis EDV, Schriftenreihe des BDG, Heft Nr. 8, 85 S.; Bonn.
- DIN 4020 (1990):
Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke. - Berlin.
- DIN 4021 (1990):
Aufschluß durch Schürfe, Bohrungen und Entnahmen von Probe. - Berlin.
- DIN 4022 (1987):
Benennen und Beschreiben von Boden und Fels. Teil 1: Schichtenverzeichnisse von Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben in Boden und Fels. - 10 S.; Berlin.
- DIN 4023 (1984):
Baugrund- und Wasserbohrungen; Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse. - 11 S.; Berlin.
- DIN 4046 (1983):
Wasserversorgung; Begriffe; Technische Regeln des DVGW. - Berlin.
- DIN 4049, Teil 1 (1989):
Hydrologie; Begriffe, Grundbegriffe und Wasserkreislauf. - Berlin.
- DIN 4049, Teil 3 (1994):
Begriffe zur quantitativen Hydrologie. - 80S.; Berlin.
- DIN 4922, Teil 1 (1978):
Stahlfilterrohre für Bohrbrunnen mit Schlitzbrückenlochung und Laschenverbindung. - Berlin.
- DIN 4922, Teil 2 (1981):
Stahlfilterrohre für Bohrbrunnen, Gewindeverbindung DN 100 - DN 500. - Berlin.
- DIN 4924 (1972):
Filtersande + Filterkiese aus Brunnenfiltern. - Berlin.
- DIN 4925, Teil 1 (1990):
Filter- und Vollwandrohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-V) für Bohrbrunnen mit Querschlitzen und Gewinde DN 40 - DN 100. - Berlin.
- DIN 4925, Teil 2 (1990):
Filter- und Vollwandrohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-V) für Bohrbrunnen mit Querschlitzen und Gewinde DN 125 - DN 200. - Berlin.
- DIN 4925, Teil 3 (1990):
Filter- und Vollwandrohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-V) für Bohrbrunnen mit Querschlitzen und Gewinde DN 250 - DN 400. - Berlin.
- DIN 18196 (1988):
Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. - Berlin.

- DIN 18302 (1988):
Allgemeine Technische Vorschriften (ATV) VOB Teil C - Bohrarbeiten. - Berlin.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1977):
Bohrungen bei der Wassererschließung. - DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 115, 19 S.; Frankfurt/M.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1983a):
Entnahme von Wasserproben bei der Wassererschließung. - DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 112, 11 S.; Frankfurt/M.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1983b):
Ermittlung, Darstellung und Auswertung der Korngrößenverteilung wasserleitender Lockergesteine für geohydrologische Untersuchungen und für den Bau von Brunnen. - DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 113, 17 S.; Frankfurt/M.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1985):
Verwendung von Spülungszusätzen in Bohrungen bei der Erschließung von Grundwasser. - DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 116, 7 S.; Frankfurt/M.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1988):
Bau und Betrieb von Grundwasserbeschaffenheitsmeßstellen. - DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 121, 19 S.; Bonn.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1989):
Gewinnung und Entnahme von Gesteinsproben bei Bohrarbeiten zur Grundwassererschließung. - DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 114, 8 S.; Bonn.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1990 c):
Einflüsse von Meßstellenausbau und Pumpenmaterialien auf die Beschaffenheit einer Wasserprobe. - DVWK-Mitteilungen Heft 20, 141 S.; Hamburg.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG / LFU (1993):
Das Modellstandortprogramm des Landes Baden-Württemberg. Erfahrungen für die Praxis der Altlastenbearbeitung; Symposium vom 03.03. - 05.03.1993. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 12, 400 S.; Karlsruhe.
- PRINZ, H. (1991):
Abriß der Ingenieurgeologie. - 2. Aufl., 466 S.; Stuttgart.
- ULRICH, G. (1982):
Bohrtechnik. - 3. Aufl., Teil 2, 323 - 358; Berlin.
- WALLRAUCH, E. (1969):
Verwitterung und Entspannung bei überkonsolidierten tonig - schluffigen Gesteinen Südwestdeutschlands. - Diss. Universität Tübingen.

Literatur: Probennahme Wasser

- BARCZEWSKI, B., GRIMM-STREHLE, J., BISCH, G. (1993):
Überprüfung der Eignung von Grundwasserbeschaffenheitsmeßstellen. - Wasserwirtschaft 83, Heft 2, S. 72 - 78.
- BARCZEWSKI, B. & MARSHALL, P. (1990a):
Untersuchungen zur Probennahme aus Grundwassermeßstellen. - Wasserwirtschaft 80, Heft 10, S. 506 - 513.

- DIN 38402, Teil 13 (1984):
Probennahme aus Grundwasser. - Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Berlin.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1983a):
Entnahme von Wasserproben bei der Wassererschließung. - DVGW-Regelwerk, Merkblatt W 112, 11 S.; Frankfurt/M.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1982):
Entnahme von Proben für hydrogeologische Grundwasseruntersuchungen. - DVWK Merkblatt H. 203, 26 S.; Hamburg.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1990 c):
Einflüsse von Meßstellenausbau und Pumpenmaterialien auf die Beschaffenheit einer Wasserprobe. - DVWK-Mitteilungen Heft 20, 141 S.; Hamburg.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1992):
Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben. - Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 128, 41 S.; Bonn.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1994):
Grundwassermeßgeräte. - Schriften Heft 107, 241 S.; Hamburg.
- JONES, I. & LERNER, D. N. (1995):
Level-determined sampling in an uncased borehole. - Journal of Hydrology, Vol. 171, NOS 3-4, Special Issue: Groundwater Sampling, S. 291 - 317; Amsterdam.
- KALERIS, V. (1992b):
Strömungen zu Grundwassermeßstellen mit langen Filterstrecken bei der Beprobung mit Hilfe von Packern. - Wasser und Boden, Heft 8/92, S. 497-503.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1993):
Grundwasserüberwachungsprogramm, 66 S.; Karlsruhe.
- LERNER, D. N. & TEUTSCH, G. (1995):
Recommendations for level - determined sampling in wells. - Journal of Hydrology, Vol. 171, NOS 3-4, Special Issue: Groundwater Sampling, S. 355 - 379; Amsterdam.
- MARSHALL, P. (1993):
Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Ein-Bohrloch-Meßverfahren. - Mitteilungen Inst. f. Wasserbau, Heft 79, 161 S.; Stuttgart.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg., 1989):
Anleitung zur Probenahme von Grund-, Roh- und Trinkwasser. - in: Handbuch Hydrologie Baden Württemberg, Grundwasserüberwachungsprogramm - Konzepte und Grundsatzpapiere, Kap. 3.8; Stuttgart.
- NILSSON, B., JACOBSEN, R., ANDERSEN, L. J. (1995b):
Development and testing of aktive groundwater samplers. - Journal of Hydrology, Vol. 171, NOS 3-4, Special Issue: Groundwater Sampling, S. 223 - 238; Amsterdam.
- SCHIRMER, M., JONES, I., TEUTSCH, G. & LERNER, D. N. (1995):
Development and testing of multi-port sock samplers for groundwater. - Journal of Hydrology, Vol. 171, NOS 3-4, Special Issue: Groundwater Sampling, S. 239 - 257; Amsterdam.
- TEUTSCH, G., BARCZEWSKI, B. & KOBUS, H.:
Bewertung von Grundwasserprobenahmetechniken zur Erkundung und Überwachung von Altlasten. - 3. Intern. KfK/TNO Conference on waste deposit sites, Karlsruhe, 10.12 - 14.12.93, S. 651 - 661; Dordrecht.

TEUTSCH, G. & PTAK, T. (1989):

The In-Line-Packer-System. A modular multilevel sample for collecting undisturbed ground-water samples. - Proceedings of the IAHR International Symposium on contaminant transport in Groundwater, Stuttgart 4.4 - 6.4.89, S. 455 - 456; Rotterdam.

Literatur: Hydrologische Methoden

ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG FH-DGG (1977):

Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate. - Geol. Jb., C 19: S. 3 - 98; Hannover.

DIN 4049, Teil 1 (1992):

Hydrologie; Begriffe, Grundbegriffe und Wasserkreislauf. - 12S.; Berlin.

DIN 4049, Teil 2 (1990):

Hydrologie; Begriffe der Grundwasserbeschaffenheit. - 25S.; Berlin.

DIN 4049, Teil 3 (1994):

Begriffe zur quantitativen Hydrologie. - 80 S.; Berlin.

DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1994):

Grundwassermeßgeräte. - Schriften Heft 107, 241 S.; Hamburg.

DYCK, S. & PESCHKE, G. (1989):

Grundlagen der Hydrologie. - 408 S.; Berlin.

HÖLTING, B. (1992):

Hydrogeologie. - 4. Aufl., 415 S.; Stuttgart.

KILLE, K. (1970):

Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. - Z. dt. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrochem., S. 89 - 95; Hannover.

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1991):

Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 8, 104 S.; Karlsruhe.

LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1984):

Grundwasserrichtlinien und Auswertung, Teil 1: Grundwasserstand. - 43 S.; Essen.

MATTHESS, G. & UBELL, K. (1983):

Allg. Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt. - Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. I, 438 S.; Berlin, Stuttgart.

NATERMANN, E. (1951):

Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflußlinie (TWL). - Wasserwirtschaft (Sonderheft); Stuttgart.

SCHROEDER, G. (1955):

Die Grundwasserreserven der Flußgebiete. - Bes. Mitt. Dtsch. Gewässerkundl. Jahrb., 5; Koblenz.

VILLINGER, E. (1981):

Das modifizierte Verfahren MoMnQr12 zur raschen Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate aus dem Vorfluterabfluß. - GWF, Wasser/Abwasser, 122 (8), S. 335 - 338; München

WUNDT, W. (1953a):
Gewässerkunde. - 320 S.; Berlin, Göttingen, Heidelberg.

Literatur: Hydraulische Methoden

- BARCZEWSKI, B. & MARSHALL, P. (1987):
Neue Methoden zur Bestimmung kleinster Strömungsgeschwindigkeiten und zur Messung von Markierungsstoffen in Grundwassermeßstellen. - Wissenschaftlicher Bericht HWV 086, Inst. f. Wasserbau, Universität Stuttgart; Stuttgart.
- BARENBLATT, G. E., ZHELTOV, I. P. & KOCHINA, I. N.,(1960):
Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks. - Journal of Applied Mathematics and Mechanics (UdSSR), 24, S. 1286 - 1303.
- BEYER, W. (1964):
Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilung. - Wasserwirtschaft - Wassertechnik (WWT): S. 165-169; Berlin-Ost.
- BOULTON, N. S. (1963):
Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. - Proc. Inst. Civ. Eng., 28, S. 603 - 610.
- BOULTON, N. S., & STRELTSOVA, T. D. (1977):
Unsteady flow to a pumped well in a two-layered water-bearing formation. - J. of Hydrology, 35, S. 245 - 256.
- BOURDET, D. & GRINGARTEN, A. C. (1980):
Determination of fissure volume and block size in fractured reservoirs by type curve analysis, presented at the SPE-AIME 55th Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas. - Society of Petroleum engineers, SPE-9293.
- BOURDET, D., WHITTLE T. M., DOUGLAS, A. A. & PIRARD, Y. M. (1983a):
A new set of type curves simplifies well test analysis. - World Oil (May 1983), 7 S., Houston (Texas, U.S.A).
- BOURDET, D., AYOUB, J. A., WHITTLE, T. M., PIRARD, Y. M. & KNIAZEFF, V. (1983b):
Interpreting well tests in fractured reservoirs -World Oil (October 1983), 7 S.; Houston (Texas, U.S.A.).
- BOUWER, H. & RICE, R. C. (1976):
A slug test for determining hydraulic conductivity with completely or partially penetrating wells. - Water Resources Research, 12, S. 423 - 428.
- BREDEHOEFT, J. D. & PAPADOPOULOS, S. (1980):
A method for determining the hydraulic properties of tight formations. - Water Resources Research, Vol. 3, No1, S. 263 - 269.
- CINCO, H. & SAMANIEGO, F. (1977):
Effect of wellbore storage and damage on the transient pressure behavior of vertically fractured wells. -Soc. Petrol. Engineers of AIME SPE 67121, 8 S.; Dallas (Texas,U.S.A.).
- CINCO, H. & SAMANIEGO, F. (1978):
Transient pressure analysis for fractured wells, presented at the SPE-AIME 53rd Annual Fall TechnicalConference and Exhibition; Houston (Texas, U.S.A.) - Society of Petroleum Engineers, SPE-7490.

- COOPER, H. H., BREDEHOEFT, J. D. & PAPADOPOULOS, I. S. (1967):
Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water. -Water Resources Research, 3, S. 263 - 269.
- COOPER H. H. & JACOB, C. E. (1946):
A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Am. Geophys. Union Trans., 27, S. 526 - 534.
- DIN 18123 (1983):
Bestimmung der Korngrößenverteilung. - Berlin.
- DIN 18130, Teil 1 (1989):
Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Laborversuche. - Berlin.
- DIN 4021 (1990):
Aufschlüsse durch Schürfe, Bohrungen und Entnahme von Proben. - Berlin.
- DIN 4022, Teil 1 (1987):
Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben in Boden und Fels. - Berlin.
- DIN 4022, Teil 2 (1981):
Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen im Fels (Festgestein). - Berlin.
- DIN 4022, Teil 3 (1982):
Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen mit durchgehender Gewinnung von gekernten Proben im Boden (Lockergestein). - Berlin.
- DIN 4049, Teil 1 (1992):
Hydrologie; Begriffe, Grundbegriffe und Wasserkreislauf. - 12S.; Berlin.
- DIN 4049, Teil 2 (1990):
Hydrologie; Begriffe der Grundwasserbeschaffenheit - Berlin.
- DROST (1983):
Single well techniques. - In: Tracer Methods in Isotope Hydrology. IAEA-TECDOC, 291: S. 7 - 16; Wien.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1975):
Technische Regeln für die Ausführung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung. - DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 111, 11 S.; Frankfurt/M.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1994):
Grundwassermeßgeräte. - Schriften Heft 107, 241 S., Hamburg.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1994):
Markierung von Grundwasser und oberirdischen Gewässern - Planung, Durchführung und Auswertung. - 12. Fortbildungslehrgang Grundwasser, 04.10.- 07.10.1994, 298 S.; Dresden.
- ERTEL, T. (1995):
Erkundungsmethodik für Grundwassergefährdungen durch Altlasten und kontaminierte Standorte im Festgestein anhand einer zusammenfassenden Auswertung dreier Standorte des Modellstandortprogramms des Landes Baden - Württemberg. - Dissertation in Bearbeitung, Universität Stuttgart.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg., 1994):
Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen. - Informationen 6, 114 S.; Freiburg.

- GRINGARTEN, A. C. & RAMEY, H. J., Jr. (1974):
Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration or restricted entry. - Society of Petroleum Engineers Journal, 14, S. 413.
- GRINGARTEN, A. C., BOURDET, D., LANDELL P. A. & KNIAZEFF, V.ÊJ. (1979):
A comparison between different skin and wellbore storage type-curves for early-time transient analysis; presented at the SPE-AIME 54th Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, Society of Petroleum Engineers, SPE 8025.
- GRINGARTEN A. C. & WHITESPOON, P. A. (1972):
A method of analyzing pump test data from fractured aquifers. - Inst. Soc. Rock Mechanics and Int. Ass. Eng. Geol. proc. Symp. Rock Mechanics, Vol. 3, S. 1-9; Stuttgart
- GRISAK, G. E., PICKENS, J. F., AVIS J. D., BELANGER, D. W. (1985):
Hydrologic testing of cristalline rocks during the NAGRA deep drilling program. - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht 85-08: 194 S.; Baden (Schweiz).
- HANTUSH, M. S. (1956):
Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. - Am. Geophys. Union, Transactions, 37, S. 702-714.
- HAWKINS, M. F., Jr. (1956):
A note on the skin effekt. - Trans. AIME, 207, S. 356-357.
- HAZEN, A. (1893):
Some physical properties of sands and gravels: with special reference to their use in filtration. - Am. Rep. Mass. State Bd. Health 24: S. 541 - 556; Boston.
- HEITFELD, K.-H. (1979):
Durchlässigkeitsuntersuchungen im Festgestein mittels WD-Testen. - Mitt. Ing.- u. Hydrogeol., 5: S. 175 - 218, 20 Abb.; Aachen.
- HEKEL, U. (1994):
Hydrogeologische Erkundung toniger Festgesteine am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium). - Diss. Univ. Tübingen, TGA, Reihe C, Nr. 18, 170 S., Tübingen.
- HÖLTING, B. (1992):
Hydrogeologie. - 4. Aufl., 415 S.; Stuttgart.
- HORNER, D. R. (1951):
Pressure build-up in wells. - Proc. Third World Petroleum Congress, The Hague, Section II, S. 503 - 523; Den Haag.
- HUFSCHMIED, P. (1983):
Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockergesteins-Grundwasserleitern, eine vergleichende Untersuchung verschiedener Feldmethoden. - Diss. Nr. 7397, ETH Zürich, Schweiz.
- HVORSLEV, M. J. (1951):
Time lag and soil-permeability in groundwater observations. - Waterways. US Corps. Of engineers, Waterways Experimental Stn. Bull. No.36: 50 S.; Vicksburg (Miss., U.S.A.).
- JOHNSON, A. I., PRILL, R. C. & MORRIS, D. A. (1963):
Specific yield-column drainage and centrifuge moisture content. - Geol. Survey Water-Supply Paper 1662-A: 60 S.; Washington D. C. (U.S.A.).
- KÄSS, W. (1992):
Geohydraulische Markierungstechnik. - Lehrbuch der Hydrologie, Band 9, 519 S.; Berlin.

- KLOTZ, D. (1994):
Einbohrlochtechnik. - In: DVWK (1994): 12. Fortbildungslehrgang Grundwasser, S. 227 - 236; Bonn.
- KÖHLER, H. P. (1965):
Ein kombiniertes Verfahren zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Sand- und Kiesgemischen für Wasser aus Siebproben. - Bergbautechnik 15, S. 338 - 342; Freiberg.
- KOLLBRUNNER, C. F. (1946):
Foundation and Consolidation. - Bd. I, 476 S.; Zürich.
- KRAUSS, I. (1977):
Das Einschwingverfahren - Transmissivitätsbestimmung ohne Pumpversuch. - GWF-Wasser/Abwasser, 118, S. 407 - 410.
- KRUSEMAN, G. P. & DE RIDDER, N. A. (1991):
Analysis and evaluation of pumping test data. - 2nd edition - Publ. 47, 377 S.; ILRI (Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvement), (Wageningen). Dtsch. Übersetzung der 1. Auflage: UEHLEND AHL, A. W. (1973): Untersuchung und Anwendung von Pumpversuchsdaten, 167 S.; Köln.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN WÜRTTEMBERG (1991):
Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 8, 104 S.; Karlsruhe.
- LANGGUTH, H. R. & VOIGT, M. (1980):
Hydrogeologische Methoden, 486 S.; Berlin.
- LÖW, S., EHLERS, F., ANDREWS R. W., McNEISH, J., VOMVORIS, S. & HUFSCHMIED, P. (1988):
Quantitative analysis of electrical conductivity logs in the Leuggern Borehole. - Switzerland: AGU Fall Meeting, Special Session on "Field Scale Characterization of Hydraulic and Transport Properties of Fractured Rock", San Francisco 6.-12. December 1988.
- MALOSZEWSKI, P. (1992):
Bemerkungen über die Interpretation von Markierungsversuchen im Grundwasser. - GSF-Inst. f. Hydrologie, Jahresbericht 1991, S. 2 - 19; München.
- MARSHALL, P. (1993):
Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren. - Mitt. Inst. f. Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 79, 161 S.; Stuttgart.
- MAVOR, M. J. & CINCO, H. (1979):
Transient pressure behavior of naturally fracture reservoirs, presented at the 1979 California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers, SPE-7977.
- MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (1976):
Arbeitsblatt Pumpversuche in Porengrundwasserleitern. - Schriftenreihe Wasserwirtschaftsverwaltung Baden-Württemberg, 124 S.; Stuttgart.
- MOSER, H. & MANERT, W. (1980):
Isotopenmethoden in der Hydrologie. - Lehrbuch der Hydrologie, Band 8, 400 S.; Berlin.
- MÜLLER, C., 1984:
Transmissivitätsuntersuchungen mit dem Einschwingverfahren - Vergleichende Untersuchungen in vollkommenen und unvollkommenen Brunnen. - Berichte Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Kiel, Nr. 3, 105 S.; Kiel.

- PAPADOPOULOS, I. S., BREDEHOEFT, J. D. & COOPER, H. H., Jr. (1973):
On the analysis of slug test data. - *Water Resources Research*, 9, S. 1087-1089.
- PAPADOPOULOS, I. S. & COOPER, H. H., Jr. (1967):
Drawdown in a well of large diameter. - *Water Resources Research*, 3, S. 241 - 244.
- PRINZ, H. (1991):
Abriß der Ingenieurgeologie, 2. Aufl., 466 S.; Stuttgart.
- PTAK, T. & TEUTSCH, G. (1994):
A comparison of investigation methods for the prediction of flow and transport in highly heterogeneous formations. - In: DRACOS & STAUFFER (eds): *Transport and Reactive Processes in Aquifers*, S. 157 - 163.; Rotterdam.
- RAMEY, J. J., HENRY, J., AGARWAL, R. G. & MARTIN, J. (1975):
Analysis of slug test at DST flow period data. - *Journal Canadian Petroleum Technology*, 14, S. 37 - 42; Montreal.
- RICHTER, W. & LILLICH, W. (1975):
Abriß der Hydrogeologie. -281 S.; Stuttgart.
- SNOW, D. T. (1968):
Anisotropic permeability of fractured rock. - In: DE WIEST, R. (ed.): *Hydrologian flow through porous media*. New York.
- STOBER, I. (1984):
Hydrogeologische Untersuchungen in Festgesteinen Südwestdeutschlands mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. - Diss. 122 S.; Freiburg.
- STOBER, I. (1986):
Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen - *Geol. Jb, Reihe C* 42, 204 S.; Hannover.
- STRAYLE, G. (1983):
Pumpversuche in Festgesteinen. - *DVGW-Schriftenreihe Wasser*, Nr. 34, S. 305 - 325; Eschborn.
- THEIS, C. V. (1935):
The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. - *Am. Geophys. Union Trans.*, 16, S. 519 - 524.
- THIEM, G. (1906):
Hydrogeol. Methoden - 56 S.; Leipzig.
- THOMPSON, D. B. (1987):
A microcomputer program for interpreting Time-Log permeability tests. - *Groundwater*, Vol. 25, No2, S. 212 - 218.
- TSANG, C. F. & HUFSCHMIED, P. (1988):
A borehole Fluid Conductivity Logging Method for the Determination of Fracture Inflow Parameters: NAGRA Technischer Bericht 88-21.
- VAN DER KAMP, G. (1976):
Determining aquifer transmissivity by means of well response tests: the underdamped case. - *Water Resources Research*, 12, S. 71-77.
- WANG, J. S. Y., NARISIMHAN, T. N., TSANG, C. F. & WITHERSPOON, P. A. (1978):
Transient Flow in Tight Fractures. - *Proceedings of Invitational Well Testing Symposium*, S. 103 - 116; Berkeley (California, U.S.A.).

Literatur: Numerische Modellierung

- BEAR, J. (1972):
Dynamics of fluids in porous media. - 764 S.; New York.
- BEAR, J. (1979):
Hydraulics of groundwater. - McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 569 S.; New York.
- BEIMS, U. (1991):
Analyse und Auswahl von Software zur Simulation von Menge- und Güteströmungsprozessen in Porengrundwasserleitern für die Altlastenbewertung. - Unveröffentl. Studie (LfU Baden-Württemberg); Karlsruhe.
- CARRERA, J. (1988):
State of the art of the inverse problem applied to the flow and solute transport equations. In: CUSTODIO et. al. (eds.): Groundwater flow and quality modelling. - NATO ASI-Series C, Band 224; Dordrecht.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1985):
Voraussetzungen und Einschränkungen bei der Modellierung der Grundwasserströmung. - DVWK-Merkblätter, Heft 206, 27 S.; Hamburg.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1989):
Stofftransport im Grundwasser. - DVWK-Schriften, Heft 83, 296 S.; Hamburg.
- DE MARSILY, G. (1986):
Quantitative hydrogeology - Groundwater hydrology for engineers. - 440S.; Orlando, San Diego, New York.
- KINZELBACH, W. (1992):
Numerische Methoden zur Modellierung des Transportes von Schadstoffen im Grundwasser. - 2. Aufl., 343 S.; München.
- KINZELBACH, W. & RAUSCH, R. (1995):
Grundwassermodellierung - eine Einführung mit Übungen. - 280 S.; Stuttgart, Berlin.
- YEH, W. W.-G. (1986):
Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem. - Water Resources Research, 22 (2), S. 95-108.

Literatur: Geophysikalische Felduntersuchungen

- BERUFSVERBAND DEUTSCHER GEOLOGEN, GEOPHYSIKER UND MINERALOGEN e.V. (1993):
Geophysikalische Methoden zur Erkundung von Altlasten. - Schriftenreihe des BDG, Heft 12, 77 S.; Bonn.
- BENDER, F. (1985):
Angewandte Geowissenschaften. - Band II, Methoden der angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in der Geophysik; Stuttgart.
- BÖRNER, F. (1994):
Petrophysikalische Grundlagen für den Einsatz von IP-Messungen beim Nachweis und der Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen. - DGG-Mitteilungen; Hannover.

- BRÜCKL, E (1990):
Linien- und flächenhafte refraktionsseismische Messungen zur Erkundung von Störungszonen.
- Abfallwirtschaftsjournal, Nr. 1/2, S. 53-59.
- GELBKE, C., HEIL, R. W., LEHMANN, B., LINTKER, S., REIMERS, B., UNTERSTILL, B., DE-GUTSCH, M., WENIGER, W., KIRSCHBAUM, J., BÖLLING, S. & KLÜTE, I. (1993):
Entwicklung seismischer Verfahren zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten mit Verwendung von Luftschallquellen, Bohrlochquellen und Aufnehmerketten. - In: Berichte der Forschungsteilnehmer des Verbundvorhabens "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten", S. 335-349; Hannover.
- GEUTEBRÜCK, E. (1992):
Eigenpotentialmessungen zur Abgrenzung von Altlasten. - Terratech 1/1992, S. 16-17.
- HAAK, V. & VOGT, R. (1993):
Eine neue Anwendung der Eigenpotentialmethode zur Kartierung räumlicher und zeitlicher Variationen des Redoxpotentials in Deponien. - In: Berichte der Forschungsteilnehmer des Verbundvorhabens "Methoden zur Erkundung und Beschreibung von Deponien und Altlasten", S. 357-366; Hannover.
- KOPP, D & KLEIN, H. (1993):
Entwicklung und Erprobung von Sonden zur Überwachung des Schadstoffaustrages bei Deponien und Altlasten, Teil II: Chemische Sensoren. - In: Berichte der Forschungsteilnehmer des Verbundvorhabens "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten", S. 496-515; Hannover.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1990):
Leitlinien zur Geophysik an Altlasten. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 2, 137 S.; Karlsruhe.
- LINDNER, H. & WAGENBRETH, B. (1993):
Entwicklung und Erprobung von Sonden zur Überwachung des Schadstoffaustrages bei Deponien und Altlasten, Teil I: Geophysikalische Sonden. - In: Berichte der Forschungsteilnehmer des Verbundvorhabens "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten", S. 478-494; Hannover.
- MEIBNER, R., STÜMPEL, H., MÜCKELMANN, R., HAGEN, V., GIOTZKI, N. & KIRSCH, R. (1993):
Entwicklung seismischer Methoden zur petrophysikalischen Charakterisierung des Untergrundes bestehender oder geplanter Deponien. - In: Berichte der Forschungsteilnehmer des Verbundvorhabens "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten", S. 310-334; Hannover.
- MILLITZER, H., SCHÖN, J. & STÖTZNER, U. (1986):
Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau. - 2. Aufl., 419 S.; Stuttgart.
- NABIGHIAN, N. (1987):
Electromagnetic Methods in applied Geophysics. - Society of Exploration Geophysics; Tulsa.
- OGILVY, A. A. & KUNZMINA, E. N.:
Hydrogeologic and engineering geologic possibilities for employing the method of induced potentials. - Geophysics 37, 5, S. 839-861; Tulsa.
- PTAK, T. & TEUTSCH, G. (1994):
A comparison of investigation methods for the prediction of flow and transport in highly heterogeneous formations. - In: DRACOS & STAUFFER (eds.): Transport and Reactive Processes in Aquifers, S. 157-163.

VOGELANG, D. (1993):
Geophysik an Altlasten. - 2. Aufl., 179S.; Berlin.

Literatur: Geophysikalische Bohrlochmessungen

BERUFSVERBAND DEUTSCHER GEOLOGEN, GEOPHYSIKER UND MINERALOGEN e.V.
(1985):
Geophysikalische Messungen in Bohrlöchern. - Seminarband 7.3. - 8.3.1985, Universität Köln,
150 S.; Bonn.

BERUFSVERBAND DEUTSCHER GEOLOGEN, GEOPHYSIKER UND MINERALOGEN e.V.
(1993):
Geophysikalische Methoden zur Erkundung von Altlasten. - Schriftenreihe des BDG, Heft 12,
77 S.; Bonn.

BRADEL, E. (1985):
Bohrlochgeophysik. In: BENDER, F. (ed.): Angewandte Geowissenschaften. - Band II, Metho-
den der angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in der Geophysik; S. 610 - 660;
Stuttgart.

DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1990):
Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grund-
wasser - Zusammenstellung von Methoden, DVGW-Regelwerk Merkblatt W 110, 50 S.; Bonn.

KOPP, D & KLEIN, H. (1993):
Entwicklung und Erprobung von Sonden zur Überwachung des Schadstoffaustrages bei Depo-
nien und Altlasten, Teil II: Chemische Sensoren. - In: Berichte der Forschungsteilnehmer des
Verbundvorhabens "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Depo-
nien und Altlasten", S. 496 - 515; Hannover.

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1990):
Leitlinien zur Geophysik an Altlasten. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 2, 137 S.;
Karlsruhe.

LEHNERT, K. & ROTHE, K. (1962):
Geophysikalische Bohrlochmessungen. - Akademie-Verlag; Berlin.

LINDNER, H. & WAGENBRETH, B. (1993):
Entwicklung und Erprobung von Sonden zur Überwachung des Schadstoffaustrages bei Depo-
nien und Altlasten, Teil I: Geophysikalische Sonden. - In: Berichte der Forschungsteilnehmer
des Verbundvorhabens "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von
Deponien und Altlasten", S. 478 - 494; Hannover.

MILLITZER, H., SCHÖN, J. & STÖTZNER, U. (1986):
Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau. - 2. Aufl., 419 S.; Stuttgart.

OGILVY, A. A. & KUNZMINA, E. N.:
Hydrogeologic and engineering geologic possibilities for employing the method of induced po-
tentials. - Geophysics 37, 5, S. 839 - 861; Tulsa.

REPSOLD, H. & SCHNEIDER, E. (1988):
Bohrlochmessungen bei der Wassererschließung. In: SCHNEIDER, H. (ed.): Die Wasserer-
schließung, 3.Aufl.; Essen.

SCHLUMBERGER LIMITED (1972):
Log Interpretation. - Vol. 1, Principles; New York.

SCHLUMBERGER LIMITED (1974):

Log Interpretation. - Vol. 2, Applications; New York.

SCHLUMBERGER LIMITED (1985):

Log Interpretation charts. - 112 S.; New York.

VOGELSANG, D. (1993):

Geophysik an Altlasten. - 2. Aufl., 179 S.; Berlin.

WELLER, A. BÖRNER, F. & WOITKE, L. (1992):

Bestimmung der Gesteinsdurchlässigkeit und anderer Gesteinsparameter des oberflächennahen Untergrundes aus geophysikalischen Messungen in Rammsonden-Löchern. - In: Berichte der Forschungsteilnehmer des Verbundvorhabens "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten", S. 360 - 386; Hannover.

WELLER, A., BÖRNER, F. & WOITKE, L. (1993):

Bestimmung der Gesteinsdurchlässigkeit und anderer Gesteinsparameter des oberflächennahen Untergrundes aus geophysikalischen Messungen in Rammsonden-Löchern. - In: Berichte der Forschungsteilnehmer des Verbundvorhabens "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten", S. 448 - 455; Hannover.

Abbildungsnachweis

In der Methodensammlung wurden zur textlichen Unterstützung Abbildungen verwendet, die den nachfolgenden Literaturangaben entnommen wurden.

- **Abb. A1** aus: DODT, J. (1987a):
Die Verwendung von Karten und Luftbildern bei der Ermittlung von Altlasten. Ein Leitfaden für die praktische Arbeit. - Teil 1: Text, Teil 2: Kartenbeilagen; Düsseldorf.
- **Abb. A 2** aus: STIER, C., BEHMEL, H., SCHOLLENBERGER, U. (1990):
Wüsten, Meere und Vulkane, Baden - Württemberg in Bildern aus der Erdgeschichte. - 61 S.; Stuttgart.
- **Abb. B 1** aus: Herstellerkatalog
- **Abb. B 2** aus:
BIESKE, E. (1992): Bohrbrunnen. - 7. Aufl., 417 S.; München.
- **Abb. B 3** aus:
DIN 4023 (1984): Baugrund- und Wasserbohrungen; Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse. - 11 S.; Berlin.
- **Abb. B 4** aus: Zeichnung
- **Abb. B 5** aus:
LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG / LFU (1993): Das Modellstandortprogramm des Landes Baden-Württemberg. Erfahrungen für die Praxis der Altlastenbearbeitung. - Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 12, Symposium vom 03.03. - 05.03.1993, 400 S.; Karlsruhe.
- **Abb. C 1** aus:
KINZELBACH (1992): Numerische Methoden zur Modellierung des Transportes von Schadstoffen im Grundwasser. - 2. Aufl., 343 S.; München.
- **Abb. C 2** aus:
KINZELBACH (1992): Numerische Methoden zur Modellierung des Transportes von Schadstoffen im Grundwasser. - 2. Aufl., 343 S.; München.
- **Abb. D 1** aus: Zeichnung
- **Abb. D 2** aus:
MATTHESS, G. & UBELL, K. (1983): Allg. Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt. - Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. I, 438 S.; Berlin, Stuttgart.
- **Abb. E 1** aus:
HÖLTING, B. (1992): Hydrogeologie. - 4. Aufl., 415 S.; Stuttgart.
- **Abb. E 2** aus: Zeichnung
- **Abb. E 3** aus: Zeichnung
- **Abb. E 4** aus: Zeichnung
- **Abb. E 5** aus: Herstellerkatalog
- **Abb. E 6** aus: KRAUSS, I. (1977):
Das Einschwingverfahren - Transmissivitätsbestimmung ohne Pumpversuch. - GWF-Wasser/Abwasser, 118, S. 407-410.

- **Abb. E 7** aus:
TSANG, C. F. & HUFSCHMIED, P. (1988): A borehole Fluid Conductivity Logging Method for the Determination of Fracture Inflow Parameters: NAGRA Technischer Bericht 88-21.
- **Abb. E 8** aus:
LANGGUTH, H. R. & VOIGT, M. (1980): Hydrogeologische Methoden, 486 S.; Berlin.
- **Abb. E 9a** aus:
nach Unterlagen des GLA Ba. - Wü.
- **Abb. E 9b** aus:
KÄSS, W. (1992): Geohydraulische Markierungstechnik. - Lehrbuch der Hydrologie, Band 9, 519 S.; Berlin.
- **Abb. E 10** aus:
LANGGUTH, H. R. & VOIGT, M. (1980): Hydrogeologische Methoden. - 486 S.; Berlin.
- **Abb. E 11** aus:
HÖLTING, B. (1992): Hydrogeologie. - 4. Aufl., 415 S.; Stuttgart.
- **Abb. F 1a** aus:
KINZELBACH, W. (1992): Numerische Methoden zur Modellierung des Transportes von Schadstoffen im Grundwasser. - 2. Aufl., 343 S.; München.
- **Abb. F 1b** aus:
KINZELBACH, W. (1992): Numerische Methoden zur Modellierung des Transportes von Schadstoffen im Grundwasser. - 2. Aufl., 343 S.; München.
- **Abb. G 1** aus:
BERUFSVERBAND DEUTSCHER GEOLOGEN, GEOPHYSIKER UND MINERALOGEN e.V. (1993): Geophysikalische Methoden zur Erkundung von Altlasten. - Schriftenreihe des BDG, Heft 12, 77 S.; Bonn.
- **Abb. G 2** aus:
VOGELSANG, D. (1993): Geophysik an Altlasten. - 2. Aufl., 179S.; Berlin.
- **Abb. G 3** aus:
OGILVY, A. A. & KUNZMINA, E. N.: Hydrogeologic and engineering geologic possibilities for employing the method of induced potentials. - Geophysics 37, 5, S. 839-861; Tulsa.
- **Abb. G 4** aus:
VOGELSANG, D. (1993): Geophysik an Altlasten. - 2. Aufl., 179 S.; Berlin.
- **Abb. G 5** aus:
BERUFSVERBAND DEUTSCHER GEOLOGEN, GEOPHYSIKER UND MINERALOGEN e.V. (1993): Geophysikalische Methoden zur Erkundung von Altlasten. - Schriftenreihe des BDG, Heft 12, 77 S.; Bonn.
- **Abb. G 6** aus:
VOGELSANG, D. (1993): Geophysik an Altlasten. - 2. Aufl., 179 S.; Berlin.
- **Abb. G 7** aus:
VOGELSANG, D. (1993): Geophysik an Altlasten. - 2. Aufl., 179 S.; Berlin.

- **Abb. H 1** aus:
DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1990): Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwasser - Zusammenstellung von Methoden, DVGW-Regelwerk Merkblatt W 110, 50 S., Bonn.
- **Abb. H 2** aus:
VOGELSANG, D. (1993): Geophysik an Altlasten. - 2. Aufl., 179S.; Berlin.
- **Abb. H 3** aus:
BERUFSVERBAND DEUTSCHER GEOLOGEN, GEOPHYSIKER UND MINERALOGEN e.V. (1993): Geophysikalische Methoden zur Erkundung von Altlasten. - Schriftenreihe des BDG, Heft 12, 77 S.; Bonn.
- **Abb. H 4** aus: Meßprotokoll
- **Abb. H 5** aus:
DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1990): Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwasser - Zusammenstellung von Methoden, DVGW-Regelwerk Merkblatt W 110, 50 S., Bonn.
- **Abb. H 6** aus:
DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1990): Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwasser - Zusammenstellung von Methoden, DVGW-Regelwerk Merkblatt W 110, 50 S., Bonn.
- **Abb. H 7** aus:
DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e.V. (1990): Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwasser - Zusammenstellung von Methoden, DVGW-Regelwerk Merkblatt W 110, 50 S., Bonn.

Methoden zur fachtechnischen Kontrolle

Übersicht

Datenblatt	Methode	Parameter	Nachweisgrenzen	Bewährte Einsatzbereiche				Entwicklungsstand	Kosten/Nutzen-Verhältnis
				kontinuierliche Messung		diskontinuierl. Messung			
				in Situ	extern	in Situ	extern		
I Physikalische Methoden									
I1	Drucksonden	Wasserstand	gut	x				bewährt	gut
I2	Faseroptisch-spektroskopische Verfahren	LCKW, AKW, MKW, PAK, weitere org. Stoffe	unterschiedl.	x	x	x	x	unterschiedlich	unterschiedlich
I3	Elektrische Verfahren	Temperatur, el. Leitfähigkeit, el. Widerstand, Eigenpotential	gut	x	x	x	x	bewährt	gut
J Chemische / Physikalisch-chemische Methoden									
J1	Passive Sorbersysteme	PCB, organische Stoffe	qualitativ	x				Entw.-Bedarf	gut
J2	Photochemische Verfahren	leichtfl. organische Stoffe	gut		x			am Markt eingeführt	abhängig von der Aufgabenstellung
J3	Chemisch-photometrische Verfahren	Ammonium, Nitrat, Schwermetalle etc.	unterschiedl.				x	bewährt	gut
J4	Ionenselektive Verfahren (nicht selbstkalibrierend)	Ammonium, Chlorid, Nitrat, Calcium, Härte, pH-Wert etc.	gut			x		unterschiedlich	gut
J5	Ionenselektive Verfahren (selbst kalibr.)	Ammonium, Chlorid, Nitrat, pH-Wert etc.	gut	x				neu am Markt	unterschiedlich
J6	Elektrochemische Sonden	Sauerstoffgehalt, Schwermetalle, Nitro- und Aminoaromaten etc.	gut		x	x	x	unterschiedlich	unterschiedlich
K Biologische Methoden									
K1	Blotests	org./anorg. toxische Stoffe	qualitativ		x		x	Entw.-Bedarf	unterschiedlich
K2	Immunoassays	Pflanzenschutzmittel, MKW, PAK, PCP, Phenol, AKW, Trichlormethan	unterschiedl.		x		x	teils Entw.-Bedarf	gut
L Sonstige Methoden									
L1	Datensammler	alle	-	x	x	x	x	bewährt	gut
<small>in Situ = Messung in GWM fettgedruckte Parameter wurden in den Praxistests gemessen extern = Messung außerhalb GWM;</small>									

I Physikalische Methoden

I1 Wasserstandsmessung mit Drucksonden

Ziel

Kontinuierliches Erfassen der Schwankungen des Grundwasserspiegels im Zeitverlauf.

Anwendung

Voraussetzung: Grundwassermeßstellen müssen auf Funktionstüchtigkeit geprüft und höhenmäßig eingemessen sein; Mindestdurchmesser der Meßstelle 50 mm; Meßstellenausbau und Aquifergliederung müssen bekannt sein.

Theorie: Bei der kontinuierlichen Erfassung der Wasserspiegelschwankungen werden zwei Meßverfahren unterschieden. Das erste Verfahren beruht auf Längenmessungen. Hierzu zählen akustische, optische und Schwimmersysteme sowie Leitwertpegel. Das zweite Meßverfahren mißt den Wasserstand indirekt über den hydrostatischen Druck der Wassersäule. Der Druck kann über pneumatisch und elektronisch arbeitende Systeme gemessen werden (DVWK 1994).

Auf dem Markt haben sich die elektronischen Systeme mit gekoppeltem Datensammler ("Drucksonden") aufgrund der einfachen Handhabbarkeit durchgesetzt. Nachteile dieser Systeme sind häufig Langzeitdrift und Temperaturempfindlichkeit.

Aufbau des Meßsystems: Drucksonden sind i.a. aus einem Sensor, einem Verstärker und dem Gehäuse aufgebaut. Der Sensor wandelt den hydrostatischen Druck in einen elektrischen Impuls um, der vom Verstärker linearisiert und an einen Datensammler oder PC weitergeleitet wird. Bei den Sensoren werden piezoresistive oder kapazitive Systeme eingesetzt. Um den störenden Einfluß des atmosphärischen Druckes auszuschalten, ist in die Signalleitungen eine Druckausgleichskapillare eingearbeitet. Der erfaßte Meßwert wird an einen Datensammler oder PC weitergeleitet und zusammen mit dem Meßzeitpunkt abgespeichert.

Der Datensammler kann in einer separaten Einheit außerhalb oder innerhalb der Meßstelle untergebracht sein. Auf dem Markt setzen sich zunehmend kompakte, batteriebetriebene Systeme durch, die in Meßstellen mit Durchmessern ab 50 mm untergebracht werden können.

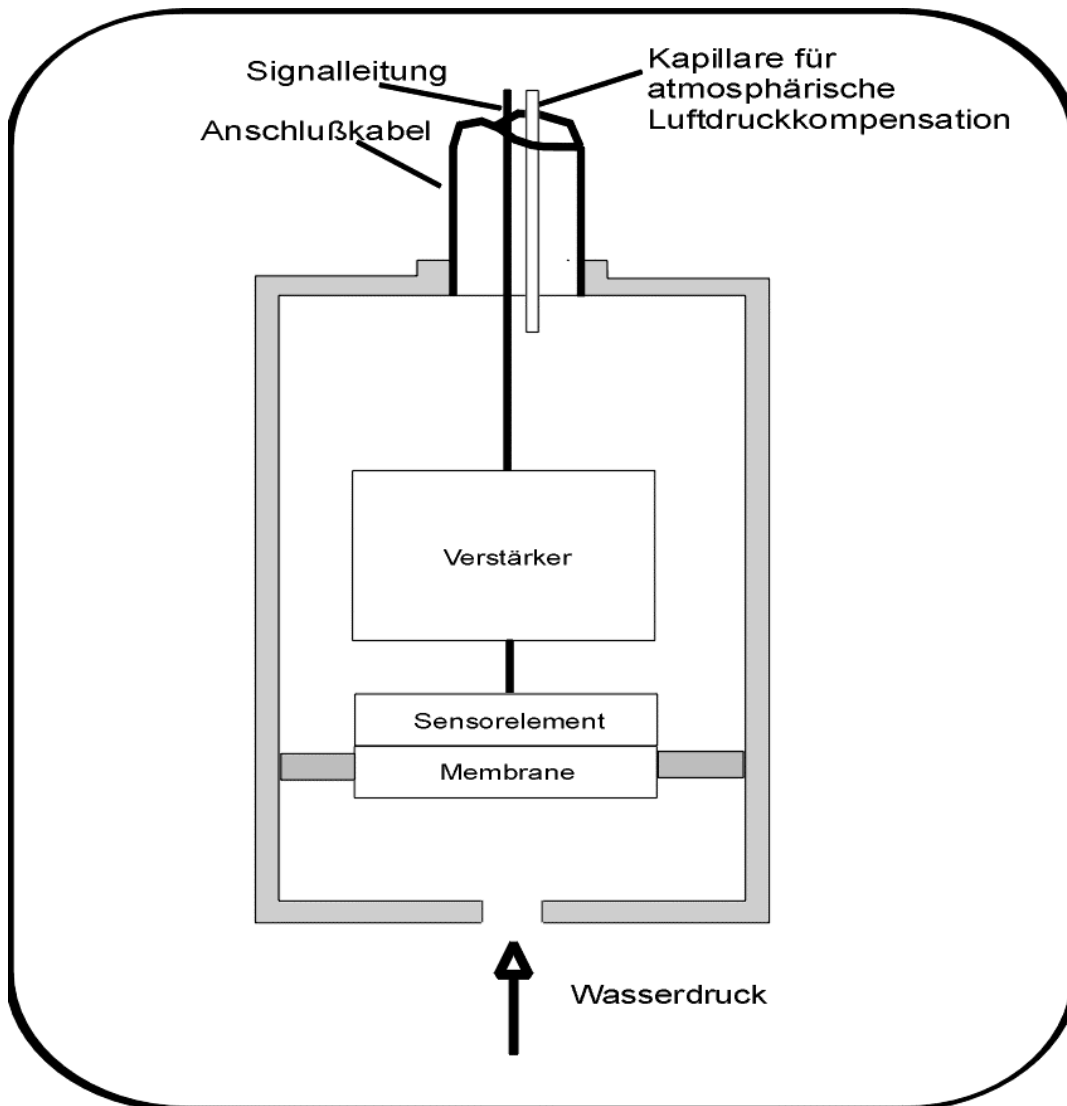


Abb. I 1: Funktionsschema einer Drucksonde (nach DVWK 1994)

Praxis: Das Drucksondensystem wird in die Meßstelle eingebaut, das Meßintervall eingegeben und der Datensammler aktiviert. In regelmäßigen Abständen sind die Funktionstüchtigkeit der Anlage zu überprüfen und die abgelegten Meßwerte auszulesen.

Auswertung: Die Wasserstandsmeßergebnisse können (zeitbezogen) als Ganglinien oder (raumbezogen) an mehreren Orten erfaßt und in Form von Grundwassergleichenplänen an ausgewählten Stichtagen dargestellt werden. Aufgrund der kontinuierlichen Erfassung sind Wasserstandsminima und -maxima gut zu ermitteln. Vgl. auch Methodensammlung Teil 1, D1; Teil 2, L1.

Kosten / Aufwand

Zuverlässige Kompaktanlagen, bestehend aus Drucksonde, Anschlußkabel (variable Längen) und Datensammler, werden von verschiedenen Herstellern ab ca. 3.000,- DM pro Meßeinheit angeboten. Wartungsaufwand gering. Z.T. kostengünstiger als manuelle "kontinuierliche" Wasserstandsmessungen.

Bewertung

Kontinuierliche Wasserstandsmessungen mit Drucksonden gehören inzwischen zu den hydrogeologischen Standardverfahren, sind technisch ausgereift und unproblematisch durchzuführen.

Literatur

DVWK (1994): Fachbuch

BARCZEWSKI et. al. (1995): Studienbericht

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil I

I2 Faseroptisch-spektroskopische Verfahren

Ziel

Erfassen der Summenkonzentration von LHKW, AKW, MKW, PAK und weiteren organischen Verbindungen im Grundwasser.

Anwendung

Voraussetzung: Funktionstüchtige Grundwassermeßstelle ab 50 mm Durchmesser.

Theorie: Faseroptisch-spektroskopische Methoden nutzen die Eigenschaft der zu messenden Schadstoffe, Licht in Abhängigkeit der Stoffkonzentration zu absorbieren, bzw. die eingestrahlte Energie in Form von Fluoreszenz wieder abzugeben. Es werden diverse Meßsysteme angeboten, die nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten.

Die nach dem **Prinzip des evaneszenten Feldes** arbeitende Meßsysteme, auf die hier näher eingegangen wird, sind geeignet für die Messung von unpolaren organischen Verbindungen, insbesondere für LHKW im Grundwasser. Das Meßsystem wird bei BÜRCK (1994) ausführlich beschrieben. Es besteht aus einem Photometer mit integriertem Datensammler, einem Quarzglaslichtleiter und einem faseroptischen Sensor. Das Photometer arbeitet im Nah-Infrarot-Bereich. Der Sensor besteht aus einer Glasfaser, die silikonummantelt und zu einer kompakten Spule aufgewickelt ist. Der hydrophobe Silikonmantel wirkt als selektive Membran, die unpolare organische Verbindungen mit CH-, NH- oder OH-Gruppen in wässriger Lösung anreichert. Durch das Eindringen der unpolaren Stoffe in den Mantel werden die Absorptionseigenschaften des Lichtleiters verändert. Aus dem Vergleich der Lichtintensität ohne und mit Schadstoffmolekülen wird die Lichtextinktion ermittelt. Nach der Kompensation der Temperatur kann über eine Kalibrierfunktion die Summenkonzentration der gemessenen Schadstoffe berechnet werden.

Praxis: Vor der eigentlichen Messung wird ein "Nullabgleich", d.h. eine Messung in entionisiertem Wasser durchgeführt. Danach wird die Sonde in die Grundwassermeßstelle eingebaut und die Schadstoffmessung gestartet. Die Ansprechzeit ist stoffspezifisch und reicht von ca. 1 Minute bis über 1 h.

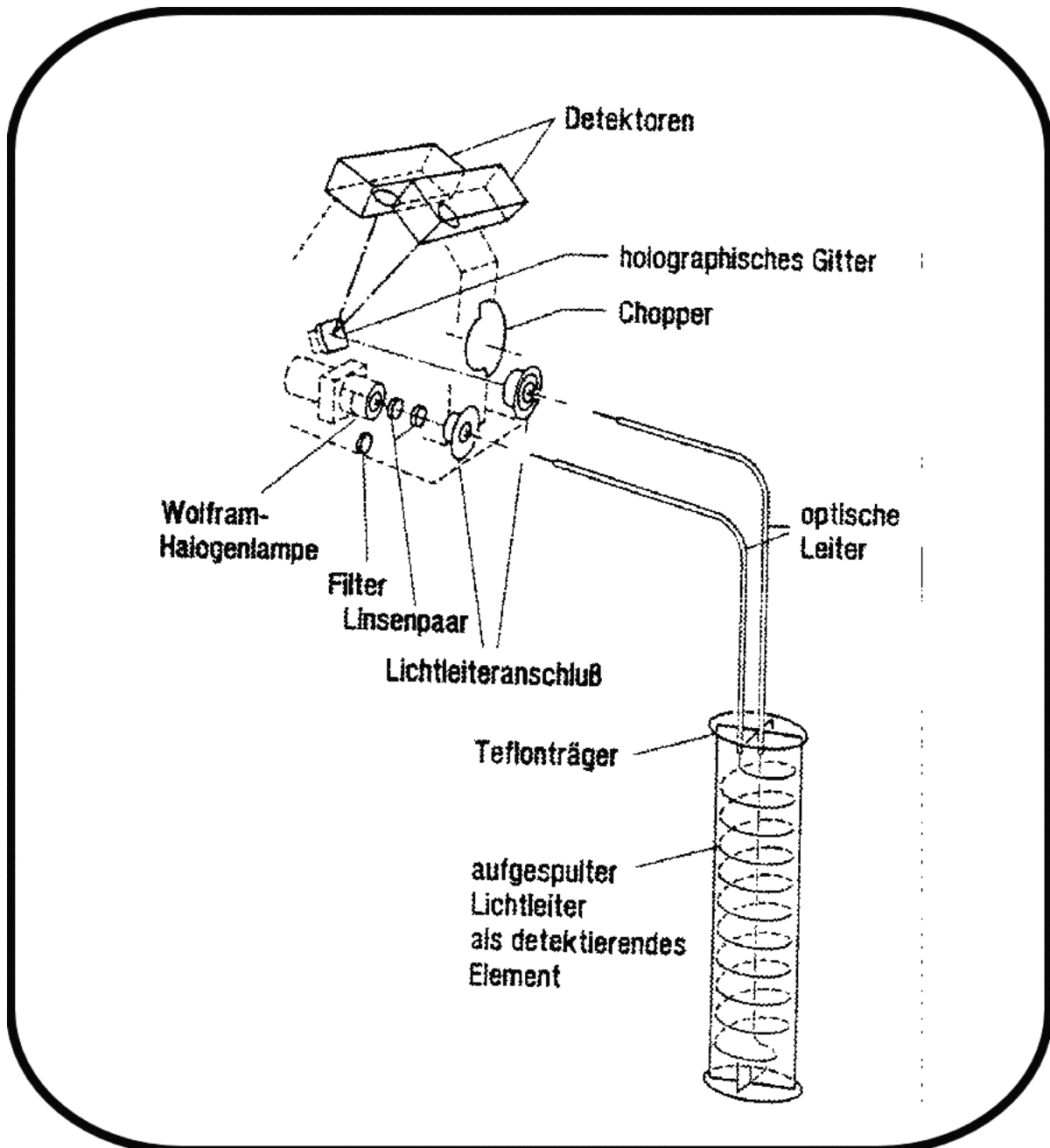


Abb. I 2: Schematischer Aufbau eines faseroptischen Meßsystems (aus: BÜRCK 1994)

Auswertung: Bei Einzelmessungen sind die Meßwerte ab Erreichen der Temperaturkonstanz auswertbar. Bei kontinuierlichen Messungen werden zeitliche Schwankungen der Konzentration erfaßt. Sie können etwa als Ganglinie dargestellt und ausgewertet werden.

Ein anderes Meßverfahren arbeitet auf der Grundlage der **Laserfluoreszenz-Spektroskopie** unter Verwendung faseroptischer Lichtleiter. Das Meßsystem ist zur quantitativen Bestimmung von PAK geeignet. MKW können qualitativ über die fluoreszierenden Bestandteile erfaßt werden. Von Vorteil sind kurze Meßzeiten und hohe Empfindlichkeit (Nachweisgrenze bei PAK im sub-ppb-Bereich). Nachteilig sind die zur Zeit noch sehr hohen Anschaffungskosten.

Kosten / Aufwand

Systeme, die nach dem Prinzip des evaneszenten Feldes arbeiten, werden ab ca. DM 16.000,- angeboten. Die Anschaffungskosten für faseroptische Meßsysteme mit Laserfluoreszenz-Spektroskopie sind mit DM 60.000,- zur Zeit noch relativ hoch. Der Betreuungsaufwand bei Langzeitmessungen ist gering verglichen mit anderen Systemen.

Bewertung

Funktionsfähige faseroptische Meßsysteme sind bereits auf dem Markt erhältlich, aber teilweise noch relativ teuer und haben hohe Nachweisgrenzen. Gute Eignung für hohe Schadstoffkonzentrationen.

Vorteile: Die erfaßten Stoffgruppen können auch kontinuierlich in Situ gemessen werden.

Nachteile: Die Nachweisgrenzen der nach dem Prinzip des evaneszenten Feldes arbeitenden Meßsysteme liegen vergleichsweise hoch (ppm- bis sub-ppm-Bereich). Problematisch sind Messungen bei komplexer oder stark schwankender Schadstoffzusammensetzung. Die Quarzglaslichtleiter sind bauartbedingt äußerst empfindlich, insbesondere bei langen Kabeln.

Literatur

BÜRCK (1994): Fachbeitrag,
CONZEN (1994): Fachbeitrag
LfU Ba-Wü (1996): Literaturstudie
NAUMER, HELLER (1990): Lehrbuch

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil I

I3 Elektrische Verfahren

Ziel

Erfassung der physikalischen Grundwassereigenschaften Temperatur und elektrische Leitfähigkeit. Erfassen von Sicker- und Fließwegen und Verlagerung von Schadstoffzonen bei salinär gekennzeichneten Schadstoffen.

Anwendung

Elektrische Verfahren umfassen eine große Gruppe verschiedener Methoden mit sehr unterschiedlichen Einsatzbereichen. Die gebräuchlichsten Verfahren sind die Messung der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers als Vor-Ort-Messung bei der Probenahme oder als kontinuierliche Messung bei Pumpversuchen. Je nach Schadstoff sind kontinuierliche Online-Messungen von Temperatur und Leitfähigkeit in Kombination mit weiteren Meßparametern auch bei der fachtechnischen Kontrolle geeignet. Weitere wichtige Verfahren sind geoelektrische Verfahren. Sie werden in der Erkundung häufig eingesetzt, sind prinzipiell aber auch in der fachtechnischen Kontrolle einsetzbar.

1. Temperaturmessung: Neben der Beobachtung der Grundwassertemperatur eignen sich die Messungen auch zur Funktionskontrolle der Grundwassermeßstelle (Vertikalströmungen, Dichtigkeit der Verrohrung, Ringraumabdichtung) und zur Feststellung von Grundwasserzutritten (LAWA 1987, VOGELSANG 1993). Daneben können mit flächenhaften Temperaturmessungen des Bodens z.B. Sickerwege an Altlasten aufgespürt werden.

Die früher verbreiteten Flüssigkeitsthermometer (Quecksilberthermometer) wurden in den letzten Jahren weitgehend von elektronischen Meßgeräten mit Temperatursensor verdrängt. Die Temperatursensoren arbeiten meist nach dem Prinzip der temperaturabhängigen Widerstandsänderung von Metallen und Halbleitern. Die geringste Langzeitdrift zeigen Temperaturfühler aus Platin. Für genaue Temperaturmessungen müssen die Geräte mindestens 1 x jährlich nachkalibriert werden. Gute digitale Meßgeräte weisen eine Auflösung von mindestens 0,1 K, einen Meßfehler von max. 0,2 K, eine Ansprechzeit (t_{90}) von unter 15 s und ein Langzeitdrift von max. 0,1 K pro Jahr auf (DVWK 1994).

Die Temperatur wird häufig mit Mehrfachmeßgeräten, etwa bei der Leitfähigkeitsmessung, mit erfaßt.

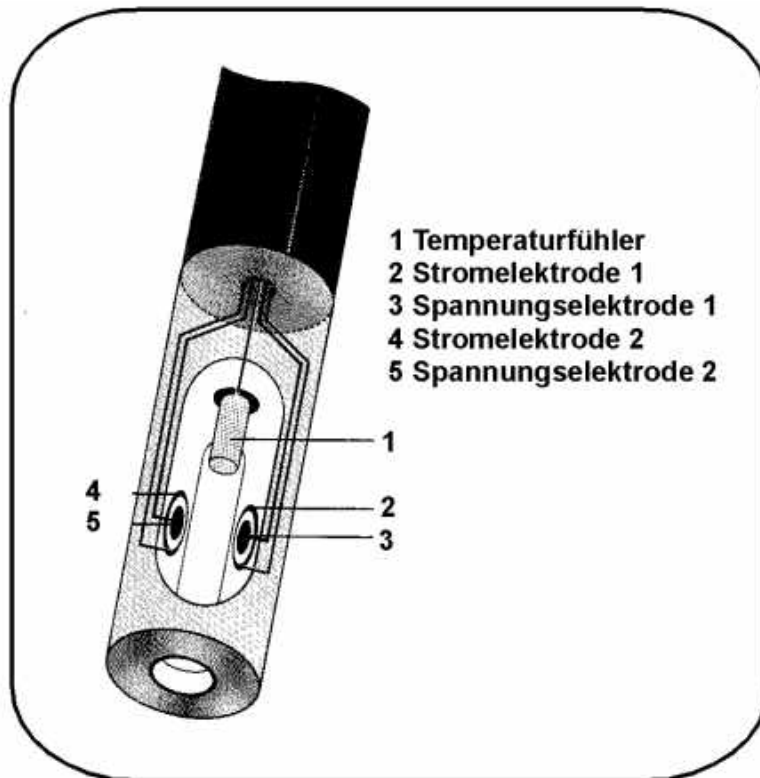


Abb. I 3: Leitfähigkeitssonde mit 4poliger Elektrodenanordnung und integriertem Temperatursensor (aus: Firmenprospekt WTW)

2. Elektrische Leitfähigkeit: Die elektrische Leitfähigkeit ist eine wichtige Grundwassereigenschaft, die in der Regel vor Ort gemessen wird. Neben der Charakterisierung der Grundwasserbeschaffenheit dient die Leitfähigkeitsmessung zur Festlegung des Probenahmezeitpunktes. Mit Leitfähigkeitstemperaturprofilen können Grundwasserzutritte lokalisiert und der vertikale Aufbau eines Grundwasserleiters charakterisiert werden.

Die Leitfähigkeitsmessung beruht auf dem Ohmschen Gesetz, das die Abhängigkeit von Spannung, Stromstärke und Widerstand beschreibt. Die elektrische Leitfähigkeit entspricht dem Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes und ist temperaturabhängig. Die elektrische Leitfähigkeit wird meist in $\mu\text{S}/\text{cm}$ angegeben (Bezugstemperatur $25\text{ }^\circ\text{C}$).

Zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit werden zwei- oder vierpolige Meßzellen eingesetzt. Zur Vermeidung von Störungen durch Polarisierungseffekte arbeiten die Meßgeräte mit Wechselstrom. Die Elektroden bestehen aus Platin oder Kunstkohle.

Viele Geräte bieten heute die Möglichkeit der Temperaturkompensation, so daß die Leitfähigkeit unmittelbar, bezogen auf die Referenztemperatur ($25\text{ }^\circ\text{C}$), abgelesen werden kann. Dabei wird meist ein mittlerer Temperaturkoeffizient von $2,2\% / \text{K}$ berücksichtigt, der bei normal mineralisierten Wässern in der Regel hinreichend genau ist.

Bei der Funktionsprüfung des Meßgerätes sind die Zellenkonstante und der Temperatursensor zu überprüfen. Zur Kalibrierung der Leitfähigkeitsmeßgeräte werden Eichlösungen mit genau definierten elektrischen Leitfähigkeiten, meist $0,01$ molarer KCl , verwandt.

Folgende Anforderungen sollte ein elektrisches Leitfähigkeitsmeßgerät erfüllen (DVWK 1994): Meßmöglichkeit der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur, Einsatzbereich von -5 bis +60 °C, Meßbereich bis 200 mS/cm, Umschaltmöglichkeit der Referenztemperatur (20 / 25 °C).

3. Geoelektrische Methoden: (Vgl. auch Methodensammlung Teil 1, G1 - G5) Zu unterscheiden sind Gleichstromverfahren und Wechselstromverfahren.

Die **Gleichstromverfahren** machen sich die unterschiedlichen spezifischen elektrischen Widerstände der Minerale, Gesteine und Inhaltsstoffe von Altablagerungen zunutze (VOGEL-SANG 1993). Geoelektrische Kartierungen und geoelektrische Tiefensondierungen werden eingesetzt zur Erkundung des geologischen Untergrundaufbaus, der hydrogeologischen Situation, der Abgrenzung von Grundwasserleitern, Grundwassergeringleitern und Sickerwegen im Umfeld von gefahrverdächtigen Flächen. Mit der Induzierten Polarisation können insbesondere Kontaminationsfahnen von salinaren Schadstoffen erfaßt und überwacht werden. Eigenpotentialmessungen beruhen auf dem Strömungspotential, das bei der Bewegung von Wässern und Gasen auftritt. Sie sind geeignet zum Nachweis von Gasaustritten, eingeschränkt auch für Sickerwässer.

Zu den **Wechselstromverfahren** wird die elektromagnetische Kartierung gezählt, mit der steilstehende grundwasserleitende Strukturen, wie Verwerfungen, Spalten und Klüftzonen erfaßt werden. Es können auch Sicker- und Fließwege von Schadstoffen überwacht werden.

Häufig werden verschiedene geophysikalische Methoden kombiniert. Es sind auch Meßanordnungen in Erprobung, die eine räumliche und zeitliche Erfassung von Sickerwasseraustritten bei Altablagerungen ermöglichen (LINDNER 1996)

Kosten / Aufwand

Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen mit handelsüblichen elektronischen Meßgeräten sind exakt, schnell durchführbar und kostengünstig.

Geoelektrische Messungen erfordern einen höheren Arbeitsaufwand und sind, je nach Verfahren, mit Kosten von DM 1,40 bis 4,30 pro gemessenem Profilmeter bzw. DM 7,- bis 240,- pro Meßpunkt (VOGELSANG 1993) anzusetzen.

Bewertung

Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen gehören zu den unerläßlichen Routinemessungen vor Ort und sind fester Bestandteil der herkömmlichen Probennahme. Sie sind bei vorschriftsgemäßer Durchführung und mit guten Geräten problemlos und zuverlässig durchzuführen.

Geoelektrische Methoden werden bei der Überwachung von gefahrverdächtigen Flächen bisher noch wenig eingesetzt. Sie bieten bei speziellen Fragestellungen jedoch neue Möglichkeiten, etwa einer flächenhaften, kostengünstigen Überwachung der Schadstoffausbreitung. Andererseits besteht bei einigen Verfahren, z.B. bei der Eigenpotentialmessung, noch Forschungsbedarf.

Literatur

- LAWA (1987): Richtlinie
LINDNER, H. (1996): Fachbeitrag
MATTHESS, G. (1994): Lehrbuch
NAUMER, H., HELLER, W. (1990): Lehrbuch
VOGELSANG, D. (1993): Fachbuch

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil I

Literatur zu Teil I

- BARCZEWSKI, B., JACOB, B., KEIM, B. (1995):
Pilotstudie zum qualitativen und quantitativen Quellmeßnetz des Landes Baden-Württemberg -
(Resümee). Technischer Bericht der Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau Nr. 94/23 (HG
211); Stuttgart
- BÜRCK, J. (1994):
EFAS-Faseroptischer Sensor zur Vor-Ort-Analytik von org. Schadstoffen. KfK Nachrichten,
Heft 1/94, S. 34ff; Karlsruhe
- CONZEN, J.-P. (1990):
Entwicklung und Charakterisierung einer faseroptischen Meßsonde zur quantitativen in-Situ-
Bestimmung wässriger Lösungen von Chlorkohlenwasserstoffen.- Bericht KfK 5302, Kernfor-
schungszentrum Karlsruhe
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1994):
Grundwassermeßgeräte.- DVWK Schriften, Heft 107, 241 S; Bonn
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (1987):
Grundwassertemperatur.- Grundwasser, Richtlinien für Beobachtung und Auswertung, Teil 2,
35 S.; Essen
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1996):
Literaturstudie Vor-Ort-Analytik.- Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung 28/96, 90S.;
Karlsruhe
- LINDNER, H. (1996):
Oberflächengeophysikalische und Monitoring-Verfahren für hydrogeologische Aufgaben.-
GeoCongress 2, Grundwasser- und Rohstoffgewinnung, Vortragskurzfassung der Tagung der
FH DGG Freiberg / Sachsen, Mai 1996, S. 303 - 307; Köln
- MATTHESS, G. (1994):
Die Beschaffenheit des Grundwassers.- Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2, 499 S.; Berlin /
Stuttgart
- NAUMER, H., HELLER, W. (HRSG; 1990):
Untersuchungsmethoden in der Chemie.- 387S., Stuttgart / New York
- VOGELSANG, D. (1993):
Geophysik an Altlasten.- 179 S.; Berlin / Heidelberg

J Physikalisch-chemische Methoden

J1 Passive Sorbersysteme

Ziel

Qualitative Erfassung der Konzentration von organischen Schadstoffen im Grundwasser. Erfassen von Konzentrationsunterschieden etwa bei vertikalen Konzentrationsprofilen des Aquifers.

Anwendung

Voraussetzung: Die Grundwassermeßstellen müssen auf Funktionstüchtigkeit geprüft sein. Meßstellenausbau und Aquifergliederung müssen bekannt sein. Zusätzlich müssen quantitative Analysen durchgeführt werden.

Theorie: Die Methode arbeitet nach dem Prinzip der passiven Adsorption der nachzuweisenden Stoffe, die auf speziellen Sorbermaterialien adsorbiert werden. Als Sorbermaterial werden stark adsorbierende Stoffe wie Aktivkohle oder Tenax eingesetzt, die in sogenannten Sorbermodulen oder Kollektoren eingebracht sind. Nach der Entnahme der Kollektoren werden die adsorbierten Schadstoffe thermisch oder durch Lösemittlextraktion desorbiert und massenspektrometrisch bzw. gaschromatographisch auf die relevanten Stoffgruppen untersucht. Die Analysenergebnisse stellen zeitintegrierte Werte dar, d.h. sie liefern eine Aussage über die Konzentration während der Expositionszeit. Nach heutigem Stand liefert die Methode lediglich qualitative Ergebnisse. Eine Eichung ist derzeit noch nicht möglich.

Praxis: Die Kollektoren werden in einer definierten Tiefe in die Meßstelle eingebaut und nach einem bestimmten Zeitintervall (meistens 10 bis 30 Tage) zur Analyse entnommen. Es können zur Ermittlung von vertikalen Schadstoffverteilungen im Aquifer auch mehrere Kollektoren in unterschiedlichen Tiefen eingebracht werden.

Auswertung: Die Analysenergebnisse können zeitlich als relative Konzentrationsganglinien oder räumlich als Konzentrationsverteilungsplan bzw. Konzentrationstiefenprofile dargestellt werden.

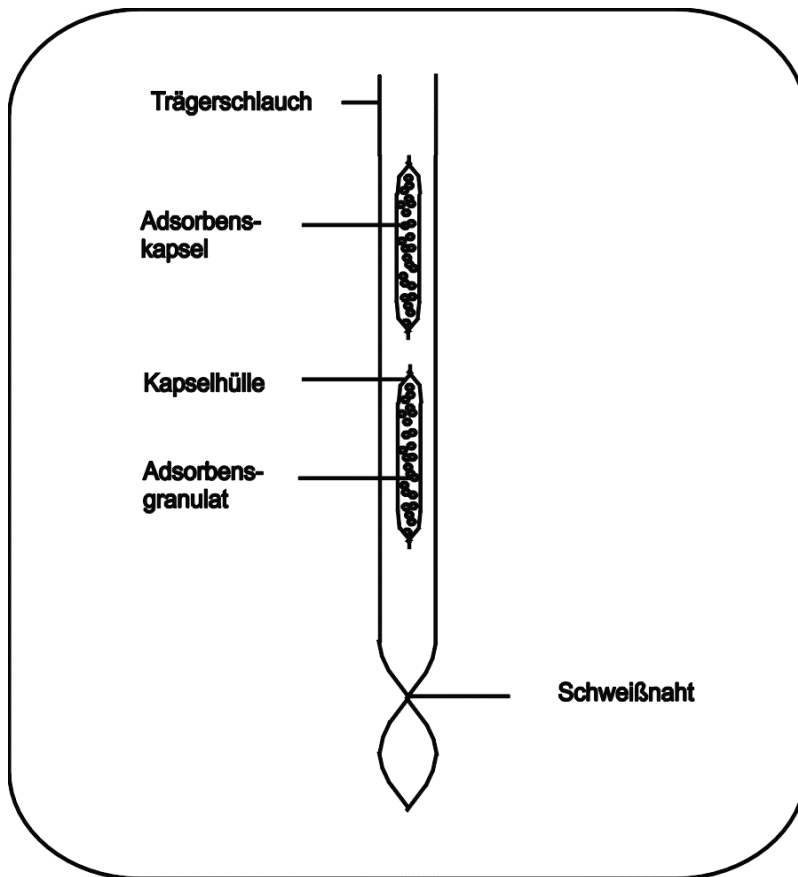


Abb. J 1: Schematische Darstellung eines Sorbermoduls (nach Firmenprospekt GORE Associates GmbH)

Kosten / Aufwand

Passive Sorbersysteme sind eine kostengünstige, einfach zu handhabende Methode. Der Anwender hat lediglich die Sorber ein- und auszubauen. Die Analytik wird durch den Anbieter durchgeführt. Die Kosten liegen, je nach Parameterumfang, bei ca. DM 200,- bis 300,- pro Sorbereinheit inkl. Analytik.

Bewertung

Im Gegensatz zu aktiven Methoden liefern passive Sorbersysteme nur relative Werte. Daher sind sie in erster Linie als zusätzliche Methode etwa neben der herkömmlichen Probennahme einzusetzen. Der Vorteil der passiven Sorbersysteme liegt im Gegensatz zur diskontinuierlichen Probennahme in der Zeitintegration der Ergebnisse, die dadurch auch kurzzeitige Schadstoffspitzen, etwa nach starken Niederschlagsereignissen, kumulativ erfassen.

Literatur

LFU Baden-Württemberg (1996): Fachbericht

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil J

J2 Photochemische Verfahren

Ziel

Kontinuierliche Erfassung von leichtflüchtigen organischen Stoffen (VOC), insbesondere von LHKW, im Grundwasser.

Anwendung

Voraussetzung: Funktionstüchtige Grundwassermeßstelle, Stromzufuhr und Stellplatz für Schaltschrank, Einleitstelle (z.B. Kanal oder Schluckbrunnen) müssen vorhanden sein. Das möglicherweise belastete Wasser ist ggf. vor der Einleitung zu reinigen.

Theorie: Das Meßprinzip beruht auf der chemischen Mineralisierung (Oxidation) flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) durch UV-Licht. Die VOC werden aus dem Probegut durch Strippen in die Gasphase überführt und anschließend in vollentsalztes Reinstwasser eingeleitet. Das Reinstwasser wird durch einen UV-Reaktor geleitet, in dem die VOC photochemisch oxidiert werden. Als Reaktionsprodukte entstehen organische und anorganische Säuren, die im Reinstwasserkreislauf dissoziieren und eine Leitfähigkeitserhöhung bewirken.

Die Konzentration wird als Summe der leichtflüchtigen organischen Verbindungen über die Änderung der Leitfähigkeit quantitativ erfaßt.

Durch permanenten Probegutdurchsatz ist eine kontinuierliche Messung der VOC möglich.

Aufbau des Meßsystems: Nach dem photochemischen Prinzip arbeitende Meßsysteme sind komplexe Anlagen mit einer Vielzahl von Einzelkomponenten. Das System arbeitet mit 3 gekoppelten kontinuierlichen Kreisläufen, dem Probegut-, Gas- und Reinstwasserkreislauf. Ausführlich beschrieben ist der Anlagenaufbau in SBF (1994). Die ganze Anlage wird von einem integrierten Rechner, der zugleich die Meßwerte speichert, gesteuert.

Praxis: Das Meßsystem wird in einem Schaltschrank vor Ort installiert. In die zu überwachende Grundwassermeßstelle wird eine kontinuierlich arbeitende Förderpumpe eingebaut und das Probegut der Anlage zugeführt.

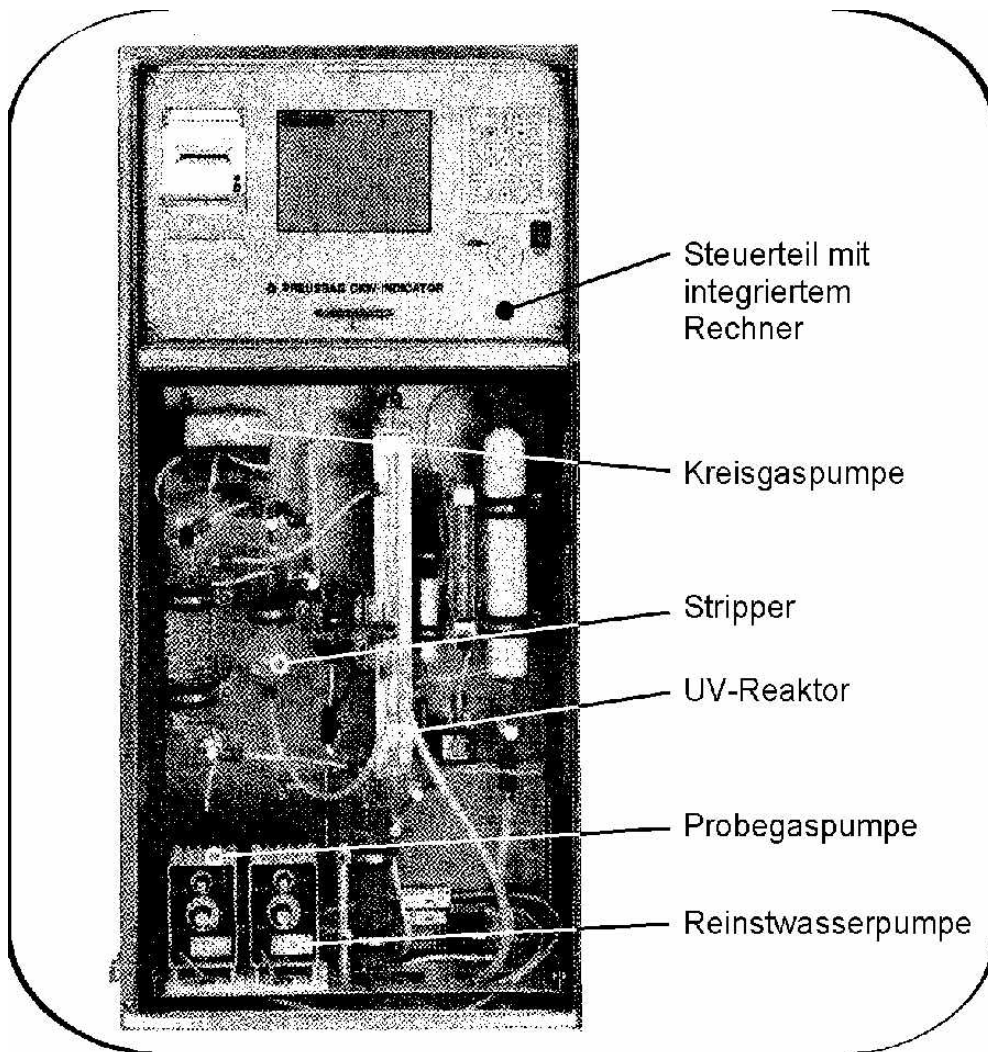


Abb. J 2: Aufbau eines photochemisch arbeitenden Meßsystems für leichtflüchtige organische Stoffe (aus: Firmenprospekt PREUSSAG GmbH)

Nach der Messung wird das Förderwasser unter Berücksichtigung der entsprechenden Einleitgrenzwerte ggf. nach Reinigung etwa über einen Aktivkohlefilter, in die Kanalisation oder einen Versickerungsbrunnen eingeleitet.

Die Messung der VOC wird automatisch durchgeführt und die Meßergebnisse als Mittelwert über ein bestimmtes Zeitintervall im Rechner abgelegt. Aufgrund der Komplexität der Anlage ist eine regelmäßige Funktionskontrolle und Wartung in kurzen Zeitabständen durch Fachpersonal unumgänglich.

Kosten / Aufwand

Das komplette Meßsystem (ohne Schaltschrank und Montagearbeiten) wird für ca. DM 50.000,- angeboten. Es fallen regelmäßige Kontroll- und Wartungsarbeiten an.

Bewertung

Die Anlagen sind unter Berücksichtigung des hohen Betreuungsaufwandes als funktionstüchtig zu bewerten.

Die Anlage muß nach vorheriger chemischer Analyse des Grundwassers entsprechend der Zusammensetzung der VOC kalibriert werden.

Vorteile: Kontinuierliche, zeitnahe Erfassung der VOC, niedrige Nachweisgrenzen bei LHKW. Konzentrationsabhängige Auslösung von Alarm, Aktivierung von Abwehrmaßnahmen etc. sind möglich.

Nachteile: Hoher Kalibrier-, Kontroll- und Wartungsaufwand. Störeffekte bei umfangreichem Schadstoffspektrum der VOC oder stark schwankender Zusammensetzung bewirken teilweise unbefriedigende Meßgenauigkeit.

Literatur

SBF WASSER UND UMWELT (1994): Handbuch

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil J

J3 Chemisch-photometrische Verfahren

Ziel

Übersichtsmäßige Erfassung von Schwermetallen, Ammonium, Cyanid, Chlorid etc. im Grundwasser.

Anwendung

Voraussetzung: Funktionstüchtige Grundwassermeßstelle und Probennahmeverrichtung müssen vorhanden sein.

Theorie: Chemisch-photometrische Verfahren beruhen auf der Gesetzmäßigkeit, daß in einer homogenen Lösung die Lichtintensität des einfallenden Lichtstrahls in Abhängigkeit von der Konzentration geschwächt wird. Die Absorption kann durch Messung mit einem Filterphotometer (eingeschränkt) quantitativ bzw. durch manuellen Vergleich mit Farbtafeln "kolorimetrisch" halbquantitativ erfaßt und in die Konzentration der Meßlösung umgerechnet werden. Für die Messung wird das Probegut mit Reagenzien, die je nach Parameter einen spezifischen Farbeffekt hervorrufen, vorbehandelt.

Die photometrische quantitative Bestimmung ist teilweise eingeschränkt, da ein Teil des Meßstrahls an der Küvettenwand reflektiert wird (NAUMER u. HELLER 1990). Auch Matrixeffekte können die Messung stören (LfU 1996b).

Praxis: Für die Konzentrationsbestimmung vor Ort werden komplette Fertigtestsysteme auf dem Markt angeboten. Das Probegut wird genau dosiert in eine Küvette gegeben und mit einem oder mehreren Reagenzien versetzt. Nach einer festgelegten Zeit wird die Farbreaktion photometrisch oder durch manuellen Farbvergleich bestimmt und die Konzentration bzw. der Konzentrationsbereich ermittelt. Je nach Meßparameter sind die Bestimmungsgrenzen sehr unterschiedlich, bei manchen Stoffen liegt die Nachweisgrenze relativ hoch.



Abb. J 3: Filterphotometer für Küvettentests (aus: Firmenprospekt MERCK)

Das Verfahren liefert lediglich halbquantitative bzw. eingeschränkt quantitative Ergebnisse.

Kosten / Aufwand

Chemisch-photometrische Verfahren sind kostengünstig und schnell durchzuführen. Filterphotometer werden ab ca. 1.000,- DM angeboten, zugehörige Chemikalien-Sets ab ca. 1,- DM pro Test.

Bewertung

Photometrische Meßsysteme sind seit Jahren auf dem Markt und als ausgereift zu bewerten. Für die Genauigkeit der Messergebnisse gelten die o.g. Einschränkungen. Die Nachweisgrenzen mancher Stoffe liegen relativ hoch.

Vorteile: Schnelle und einfache Handhabbarkeit, kostengünstige Screeningmethode.

Nachteile: Bei manchen Parametern treten Störeffekte durch Begleitstoffe auf. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Messung ist das Verfahren nur im Bereich von 20-35 °C einsetzbar, insbesondere bei der photometrischen Messung.

Literatur

LfU Ba-Wü. (1996b): Literaturstudie

NAUMER, HELLER, (HRSG; 1990): Lehrbuch

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil J

J4 Ionenselektive Verfahren ohne Selbstkalibrierung

Ziel

Kontinuierliche Ionenkonzentrationsmessungen mittels ionenselektiver Meßtechnik (pH-Wert, Chlorid, Ammonium, Nitrat, Kalzium, Wasserhärte)

Anwendung

Voraussetzungen: Die Grundwassermeßstellen müssen auf Funktionstüchtigkeit geprüft sein. Meßstellenausbau und Aquifergliederung sollte bekannt sein. Die Meßtechnik kann in Meßstellen ab 50 mm Durchmesser untergebracht werden.

Theorie: Zur kontinuierlichen Erfassung von Ionenkonzentrationen (pH-Wert, Chlorid, Ammonium, Nitrat, Kalzium und Wasserhärte) besteht die Möglichkeit, diese Parameter mittels ionenselektiver Elektroden (ISE) zu messen. Diese erlauben die Ionenaktivität bzw. -konzentration in Flüssigkeiten unabhängig von Färbung und Trübungsgrad zu bestimmen. Die ISE stellen sich auf ein konzentrationsabhängiges elektrisches Potential ein, das zusammen mit einer Referenzelektrode (z.B. pH-Meßkette) gemessen werden kann. Der theoretische Zusammenhang zwischen Aktivität bzw. Konzentration und Potential wird durch die NERNST'sche Gleichung beschrieben.

Auf dem Markt sind Meßsysteme vorhanden, die mit gekoppeltem Datensammler und interner Stromversorgung arbeiten.

Aufbau des Meßsystems: Ionenselektive Meßsysteme sind aus zwei bis vier Sensoren, einem Verstärker, einer Speichereinheit und einer Batterieeinheit aufgebaut, die in einem Gehäuse integriert sind. Die ermittelten Meßwerte werden in einem Speicher abgelegt bzw. an einen PC weitergeleitet. Alle Daten werden zusammen mit dem jeweiligen Meßzeitpunkt abgespeichert.

Der Datensammler kann in einer separaten Einheit außerhalb oder innerhalb der Meßstelle untergebracht sein. Auf dem Markt setzen sich zunehmend kompakte, batteriebetriebene Systeme durch, die in die jeweilige Meßstelle integrierbar sind.

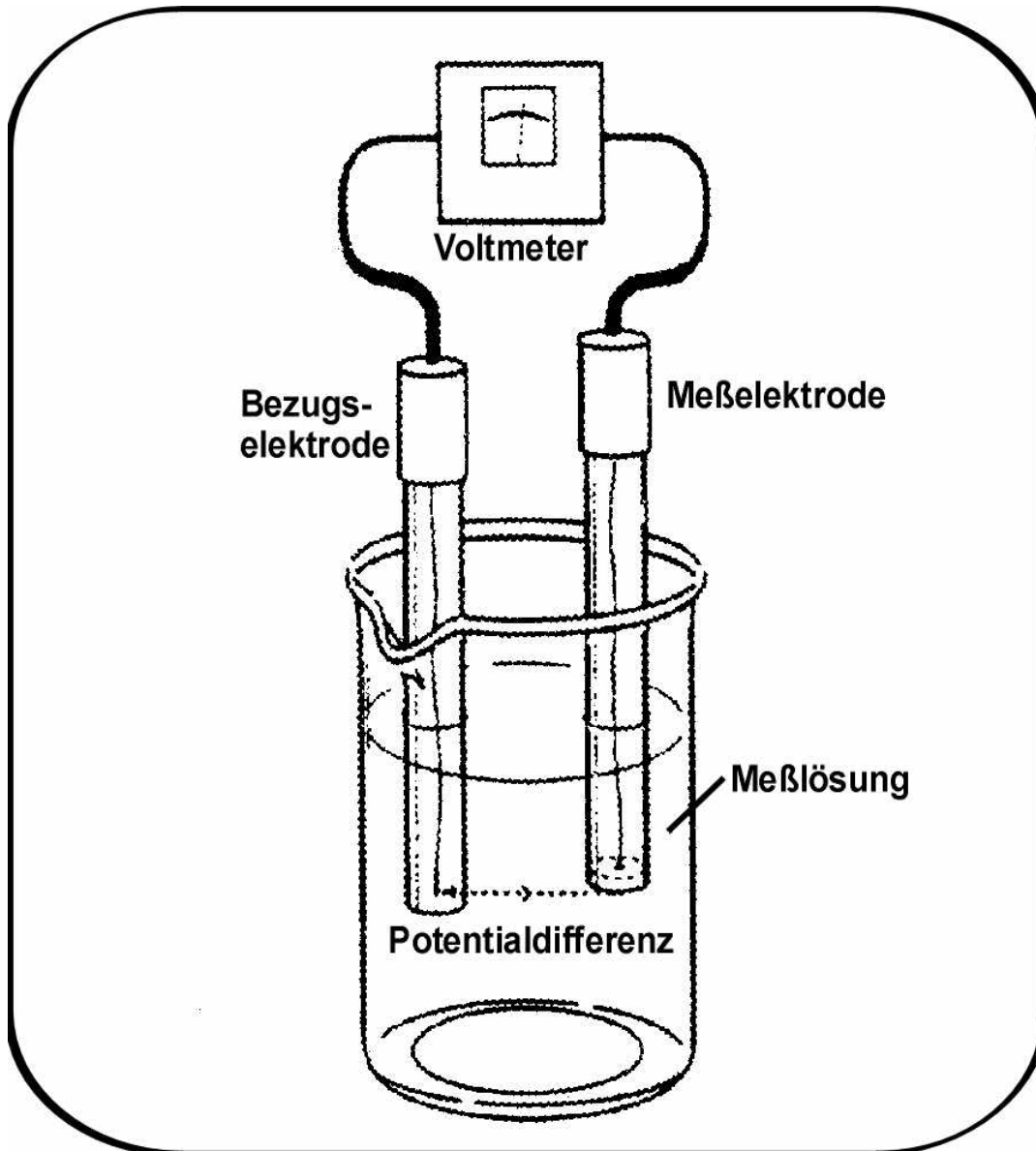


Abb. J 4: Funktionsprinzip von ionenselektiven Elektroden

Praxis: Das Meßsystem wird nach erfolgter Kalibrierung in die Meßstelle eingebaut, das Meßintervall eingegeben und der Datensammler aktiviert. Aufgrund der unter dem Absatz Bewertung beschriebenen Nachteile muß die Funktionstüchtigkeit der Anlage in relativ kurzen Zeitabständen überprüft werden (Kalibrierung).

Auswertung: Die Meßergebnisse können zeitbezogen als Ganglinie dargestellt werden. Gegebenenfalls muß aufgrund von vorhandenen Störionen, Temperaturschwankungen und der Drift nachträglich eine mathematische Korrektur der erhaltenen Meßdaten erfolgen.

Kosten / Aufwand

Ionenselektive Meßsysteme ohne Selbstkalibrierung werden je nach Aufgabenstellung in den unterschiedlichsten Konfigurationen von verschiedenen Herstellern ab ca. DM 700,- pro Meßeinheit angeboten. Der relativ hohe Wartungs- und Kontrollaufwand ist einzukalkulieren.

Bewertung

Kontinuierliche Konzentrationsmessungen mittels ISE-Meßtechnik befinden sich derzeit noch in der Erprobungsphase und sind nur mit relativ hohem Wartungsaufwand zu betreiben.

Vorteile: Die Konzentration der zu messenden Ionen kann nahezu kontinuierlich bestimmt und aufgezeichnet werden. Es können vertikale Tiefenprofile (logs) gemessen werden.

Nachteile: Ionenselektive Elektroden zeigen in der Regel eine Drift. Hierbei können Potentialverschiebungen von bis zu 1 mV/Tag bei einer Steilheit von ca. 50 mV/Dekade beobachtet werden. Unter ungünstigen Voraussetzungen können Potentialsprünge auftreten, die eine nachträgliche Auswertung und Interpretation der Daten z.T. äußerst schwierig gestalten. Demzufolge ist der Kalibrier- und Wartungsaufwand sehr hoch.

Die ISE sind nicht ausschließlich auf das Meßion empfindlich, sondern zeigen auch Querempfindlichkeiten gegenüber sogenannten Störionen. Eventuelle Störionen müssen deshalb ebenfalls quantifiziert werden.

Temperaturveränderungen im Meßsystem müssen mit erfaßt werden, da die meßbare Spannung zwischen ISE und Referenzelektrode temperaturabhängig ist. Deshalb sollte grundsätzlich bei Meßtemperatur kalibriert werden. Ist dies nicht möglich, so muß mathematisch eine Temperaturkompensation vorgenommen werden.

Literatur

NAUMER, HELLER (HRSG.,1990): Lehrbuch

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil J

J5 Ionenselektive Verfahren mit Selbstkalibrierung

Ziel

Kontinuierliche Erfassung von Ionenkonzentrationen im Grundwasser.

Anwendung

Voraussetzung: Grundwassermeßstellen müssen auf Funktionstüchtigkeit geprüft sein. Meßstellenausbau und Aquifergliederung müssen bekannt sein. Die Meßtechnik kann in Meßstellen ab 100 mm Durchmesser untergebracht werden.

Theorie: Zur kontinuierlichen Erfassung von Ionenkonzentrationen (pH-Wert, Chlorid, Ammonium, Nitrat, Kalzium und Wasserhärte) besteht die Möglichkeit, diese Parameter mittels ionenselektiver Elektroden (ISE) zu messen. Die Meßtechnik mit ISE gehört zu den Verfahren der Potentiometrie. Das Potential einer ionenselektiven Elektrode ist abhängig von der Aktivität der im Meßgut enthaltenen Meßionen. Die Größe des Potentials wird durch die NERNST'sche Gleichung beschrieben. Die Referenzelektrode liefert das für die Potentialmessung erforderliche Bezugspotential.

Neben den im Datenblatt J4 beschriebenen Meßsystemen mit gekoppeltem Datensammler und interner Batterieversorgung sind auch Systeme auf dem Markt, die in bestimmten Zeitintervallen automatisch eine Selbstkalibrierung über zwei Punkte durchführen.

Aufbau des Meßsystems: Ionenselektive, selbstkalibrierende Meßsysteme sind mit 2 bis 4 ionenselektiven Sensoren, Sensoren zur Bestimmung weiterer physikalischer Größen, zusätzlichen Geräteapplikationen wie Ventilen für die Steuerung, Pumpen, Batterieeinheit und Behältern für Kalibrierflüssigkeiten ausgestattet. Die Meßeinheit ist in einem Gehäuse integriert, das in das Grundwasser eintaucht. Batterie und Datensammler werden in einem separaten Gehäuse außerhalb oder innerhalb der Meßstelle untergebracht.

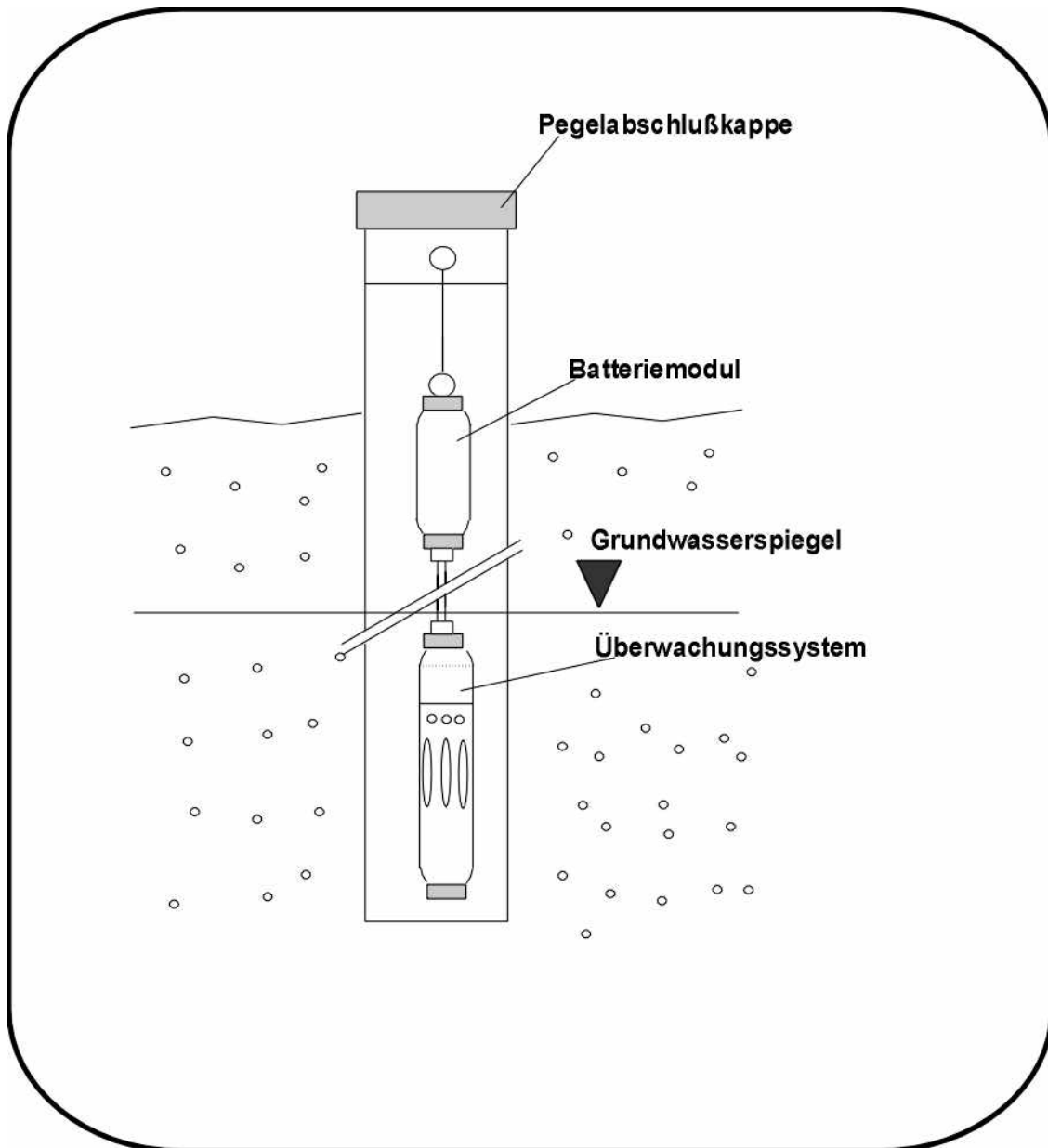


Abb. J 5: Schema des Meßsystems

Praxis: Das System wird in die Meßstelle eingebaut, das Meßintervall eingegeben und der Datensammler aktiviert. In regelmäßigen Abständen sind die Funktionstüchtigkeit der Anlage zu überprüfen und die abgelegten Meßwerte auszulesen. Ein Nachfüllen der Kalibrierflüssigkeit ist bei täglich einer Kalibrierung im Abstand von 3 Monaten vorzunehmen. Eine Datenübertragung mit Modem oder per Funk ist möglich.

Auswertung: Die Meßergebnisse erlauben eine Darstellung z.B. als Ganglinie. Eine mathematische Korrektur der ausgelesenen Meßwerte ist nicht notwendig.

Kosten / Aufwand

Ionenselektive, selbstkalibrierende Meßsysteme werden je nach Aufgabenstellung und Hersteller in verschiedenen Konfigurationen ab ca. DM 10.000.- pro Meßeinheit angeboten.

Bewertung

Kontinuierliche Konzentrationsmessungen mittels ionenselektiver, selbstkalibrierender Meßtechnik befinden sich derzeit noch in der Erprobungsphase. Ein verstärkter Einsatz in den nächsten Jahren ist wahrscheinlich.

Vorteile: Die Konzentration der zu messenden Ionen kann nahezu kontinuierlich bestimmt und aufgezeichnet werden. Eine Drift läßt sich durch die Selbstkalibrierung ausschließen. Die Lebensdauer der Sensoren ist durch die nur kurzfristige Beaufschlagung mit dem Meßmedium hoch. Es können auch vertikale Tiefenprofile (logs) gemessen werden.

Nachteile: Durch die Selbstkalibrierung ist ein höherer gerätetechnischer Aufwand notwendig. Zusätzlich muß dem Sondensystem Kalibrierflüssigkeit in bestimmten Intervallen zugeführt werden. Ein zusätzlicher Wartungsaufwand ist gegeben.

Die ISE sind nicht ausschließlich auf das Meßion empfindlich, sondern zeigen auch Querempfindlichkeiten gegenüber sog. Störionen. Eventuelle Störionen müssen ebenfalls quantifiziert werden. Temperaturveränderungen im Meßsystem werden miterfaßt, da die Spannung zwischen ISE und Referenzelektrode temperaturabhängig ist.

Literatur

NAUMER, HELLER (HRSG.,1990): Lehrbuch

HAAS, (1996): Fachbeitrag

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil J

J6 Elektrochemische Verfahren

Ziel

Erfassen von gelöstem Sauerstoff, Schwermetallen, Nitro- und Aminoaromaten (z.B. DNT, TNT) im Grundwasser.

Anwendung

In der mobilen Feldanalytik kommen in neuerer Zeit zunehmend elektrochemische Methoden zum Einsatz. Hierzu zählt auch die Voltammetrie, bei der Strom-Spannungskurven aufgenommen und ausgewertet werden. Der Stoffnachweis wird aus den Spannungswerten, die Konzentrationen aus dem Stromfluß abgeleitet (NÄSER, K.-H., PESCHEL, G. 1987). Neben Schwermetallen lassen sich auch Nitro- und Aminoaromaten und weitere Stoffe im Grundwasser bestimmen (KRAUSA, M. et.al. 1986, SCHWEDT, G. 1991). Weit verbreitet ist die Messung des gelösten Sauerstoffs im Wasser mit der amperometrisch arbeitenden CLARK-Zelle, auf die hier näher eingegangen wird.

Theorie: Der gelöste Sauerstoffgehalt einer Wasserprobe ist temperatur- und druckabhängig. Er wird entweder direkt als Konzentration oder als Sättigungsindex, d.h. als Verhältnis der aktuellen Sauerstoff- zur Sättigungskonzentration angegeben.

Die Sauerstoffmessung wird heute üblicherweise mit der von CLARK entwickelten, membranbedeckten Sauerstoffsonde durchgeführt (Abbildung J6): Durch Anlegen von Gleichstrom werden zwei Elektroden aus Gold und Silber polarisiert. In die Meßzelle hinein diffundierender Sauerstoff bewirkt einen Stromfluß an den Elektroden, über den die Sauerstoffkonzentration unter Berücksichtigung der herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen berechnet wird.

Bei modernen prozessorgestützten Geräten werden Temperatur und Druck in der Regel im Meßgerät über Sensoren erfaßt und automatisch kompensiert. Eine höhere Meßgenauigkeit wird bei Meßzellen mit drei Elektroden erreicht. Da Sauerstoff bei der Messung verbraucht wird, muß der Sensor ständig angeströmt werden, ggf. durch den Einsatz eines geeigneten Strömungserzeugers (Propeller, Rührer o.ä.).

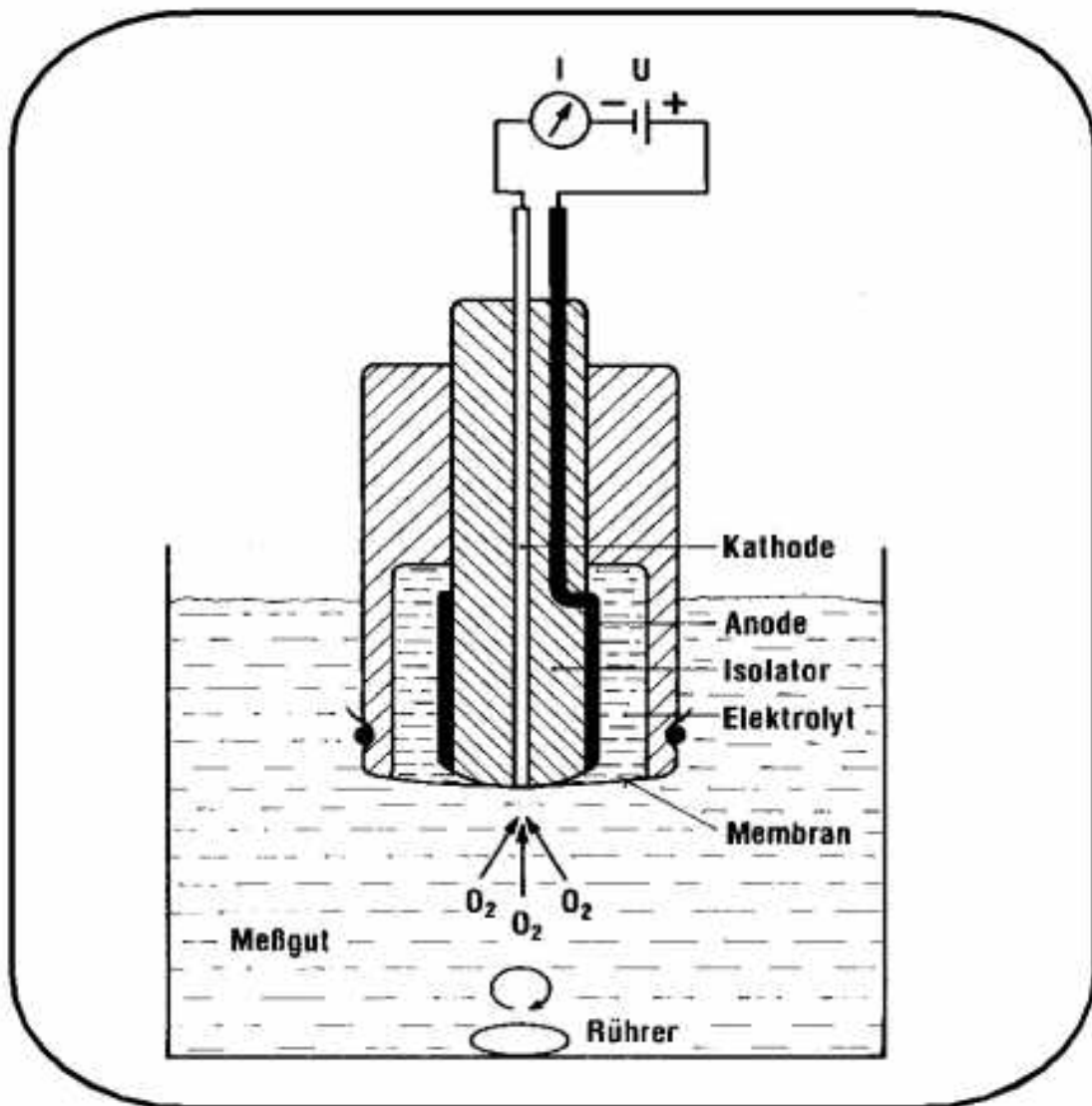


Abb. J 6: Schematischer Aufbau einer membranbedeckten Sauerstoffmeßstelle nach CLARK (aus: Firmenprospekt WTW)

Praxis: Da sich beim Transport ins Labor die Sauerstoffgehalte aufgrund von Ausgasung ändern, ist die Messung unmittelbar vor Ort durchzuführen. Auf ausreichende Anströmgeschwindigkeit ist zu achten. Insbesondere bei Tiefenmessungen, z.B. in Grundwassermeßstellen, muß ein Strömungserzeuger verwendet werden. Bei hohen Salzgehalten ist eine entsprechende Korrektur vorzunehmen.

Sauerstoffsonden sollten täglich kalibriert werden. Bewährt hat sich bei Feldmeßgeräten die Schnellkalibrierung in wasserdampfgesättigter Luft. Die Wartung der Sonde (Austausch des Elektrolytvorrats, Reinigung der Elektroden, Erneuern der Membran) sollte spätestens nach der vom Hersteller angegebenen Standzeit erfolgen.

An Sauerstoffmeßgeräte sind folgende Anforderungen zu stellen (DVWK 1994): Ausreichender mechanischer Schutz der Meßzelle, automatische Druck- und Temperaturkompensation, Genauigkeit ein Prozent des Meßbereichsendwertes und eine Ansprechzeit (t_{90}) unter einer Minute.

Kosten / Aufwand

Sauerstoffmessungen mit amperometrischen Meßzellen sind einfach, schnell und kostengünstig durchzuführen. Prozessorgestützte Sauerstoffmeßgeräte sind ab ca. 1.000,- DM auf dem Markt.

Voltammetrische Analysengeräte zur Schwermetallbestimmung werden ab ca. 30.000,- DM angeboten.

Bewertung

Bestimmung des gelösten Sauerstoffs ist ein fester Bestandteil der Vor-Ort-Analytik bei der Probennahme. Die am Markt angebotenen Sauerstoffmeßgeräte sind im allgemeinen ausgereift und zuverlässig bei vorschriftsgemäßer Handhabung.

Mobile Analysengeräte zur Schwermetallanalytik sind präzise und kompakt. Die Nachweisgrenzen liegen zum Teil sehr niedrig (unter 1 µg/l). Störanfälligkeit gegenüber organischen Stoffen (LFU 1996). Elektrochemische Detektoren zur Vor-Ort-Bestimmung von Nitro- und Aminoaromaten in Boden und Grundwasser liegen als Prototypen vor und werden derzeit für den Feldeinsatz getestet.

Literatur

- KRAUSA, M. et al. (1996): Fachbeitrag
LFU (1996): Literaturstudie
NÄSER, K.-H., PESCHEL, G. (1987): Lehrbuch
SCHWEDT, G. (1991): Fachbeitrag

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil J

Literatur zu Teil J

BARCZEWSKI, B., JACOB, B., KEIM, B. (1995):

Pilotstudie zum qualitativen und quantitativen Quellmeßnetz des Landes Baden-Württemberg - (Resümee) Technischer Bericht der Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau Nr. 94/23 (HG 211); Stuttgart

GAUGLITZ, G., GÖPEL, W. (1995):

Chemische und Biochemische Sensoren; Skript Workshop Blaubeuren 30.-31.10.1995, 19S., Tübingen

GAUGLITZ, G. et al. (1994):

Optische Chemo- und Biosensoren für die Umwelt- und Bioanalytik.- Spektrum der Wissenschaften, Heft 1/94, S. 92 ff

HAAS, (1996): Grundwasserüberwachung:

TA Wuppertal, Seminar Grundwasserüberwachung, Nov. 1996

KRAUSA, M. et al. (1996):

Elektronischer Detektor zur schnellen Bestimmung von Nitro- und Amminoaromaten in Böden und Wasser.- TerraTech, Zeitschrift für Altlasten und Bodenschutz, Heft 5/1996, S.36-38; Mainz

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1996):

Vergleichsmessungen mit aktiven und passiven Bodenluftuntersuchungsmethoden in Lichtenau.- Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung 26/96, 53 S.; Karlsruhe

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1996b):

Literaturstudie Vor-Ort-Analytik.- Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung 28/96, 90S.; Karlsruhe

NÄSER, K.-H., PESCHEL; G. (1987):

Physikalisch-chemische Meßmethoden.- 232 S.; Leipzig

NAUMER, H., HELLER, W. (HRSG; 1990):

Untersuchungsmethoden in der Chemie, 387S., Stuttgart / NewYork

REICHERT, J. (1994):

Optochem. Mikrosensoren-Potential und Einsatzmöglichkeiten i.d. Umweltanalytik.- KfK Nachrichten 1/94, S. 28ff. Karlsruhe

SBF WASSER UND UMWELT (1994)

Preussag CKW-Indikator, Bedienungs- und Wartungsanleitung; Peine

SCHWEDT, G. (1991):

Computergesteuerte Spurenanalyse von Schwermetallen - Analysengeräten im Umweltschutz, Folge 23.- Umweltmagazin, Heft 3/1991, S. 100-102; Würzburg

K Biologische Methoden

K1 Biotestverfahren zur Überwachung von Grund- und Sickerwasser

Ziel

Feststellung der toxischen Wirkung von Wasserproben auf Organismen. Dabei wird die Wirkung aller Inhaltsstoffe (Einzel- und Summenwirkung) angezeigt.

Anwendung

Voraussetzung: Gewinnung von Grund- oder Sickerwasserproben (ca. 0,5 - 2 Liter Probenmenge). Tests entsprechend DIN-, DEV- oder OECD-Richtlinien in Fachlabors.

Theorie: Testorganismen werden beim aktiven Monitoring unter definierten Bedingungen mit Wasserproben in Kontakt gebracht. Die Auswirkung von Schadstoffen werden je nach Reaktionstyp und Empfindlichkeit des verwendeten Indikators unterschiedlich angezeigt. Abhängig von enthaltener Stoffart und -konzentration können Proben unverdünnt oder mit mehreren Verdünnungsstufen getestet werden.

Neben einfachen, ohne großen Laboraufwand und mit leicht erhältlichen Organismen durchzuführenden Tests (Daphnientest, statischer Leuchtbakterientest, statischer Algentest) mit kurzer Testzeit (max. 72 h) sind Wuchstests (Kresse) mit längerer Testzeit (7 d) oder Tests mit Fischlarven (großer Laboraufwand und lange Testzeit von 10 d) geeignet. Der Embryofischttest erlaubt Aussagen über eine teratogene Wirkung. Daneben sind suborganismische Testverfahren mit z.T. gentechnologisch veränderten Bakterien (AMES-, UMU-Test) vorhanden, die Aussagen über Mutagenität oder Kanzerogenität von Proben zulassen. Diese sind nur von speziell ausgestatteten Labors durchführbar.

Praxis: Wasserproben können i.d.R. ohne eine weitergehende Aufarbeitung direkt in biologischen Wirkungstests eingesetzt werden. Die Probennahme sollte analog zur Probennahme für die chemische Analytik erfolgen. Eine Kühlung der Proben während dem Transport ist erforderlich. Vorkenntnisse über Wasserqualität und Belastung erleichtern die Auswahl des geeigneten Tests und ggf. notwendiger Verdünnungsreihen.

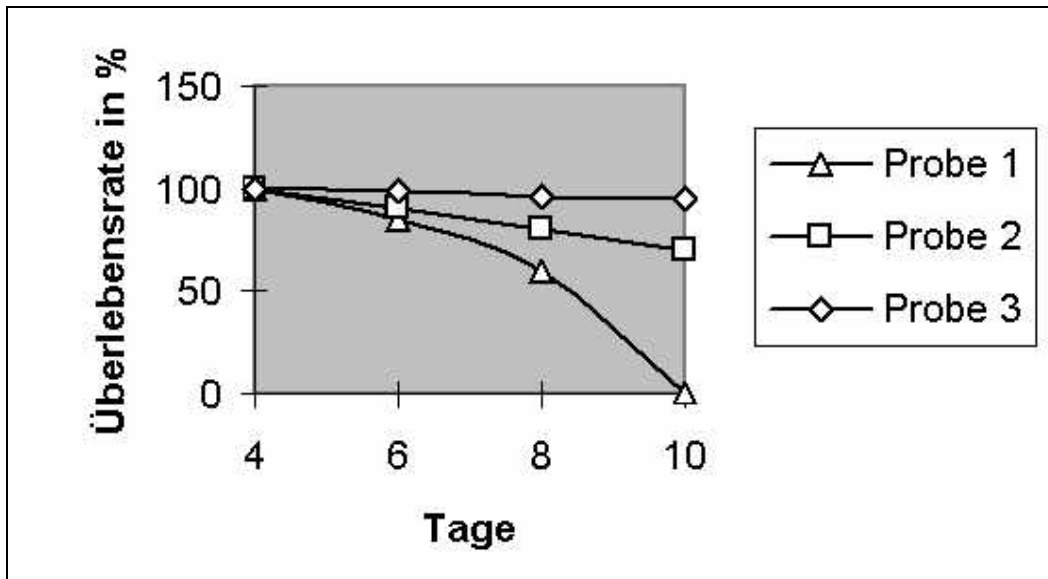


Abb. K 1: Überlebensrate von Fischembryonen nach Belastung mit Wasserproben

Kosten / Aufwand

Einfache Biotests werden ab ca. DM 150,- angeboten. Für Verdünnungsstufentests sind Preise ab ca. DM 500,- anzusetzen. Auf dem Markt gibt es deutliche Preisunterschiede.

Aufwendige Biotests werden nur von wenigen Instituten ausgeführt. Die Preise sind abhängig von der jeweiligen Versuchsanordnung und Testdauer.

Bewertung

Die Biotests stellen eine Ergänzung zur chemischen Analytik dar. Durch Biotests kann die integrale Schadwirkung von Kontaminanten ermittelt und ein einheitlicher Bewertungsmaßstab unabhängig vom Umfang der chemischen Analysen angesetzt werden.

Vorteile: Die Vielfalt der möglichen Kontaminanten kann mit Biotests sowohl hinsichtlich ihrer Einzelwirkung, als auch in ihrer Summenwirkung auf Organismen festgestellt werden. Die Organismen reagieren auf alle Inhaltsstoffe der Probe, die eine toxische Wirkung auf sie ausüben.

Nachteil: Nachweis und quantitative Ergebnisse der vorhandenen Einzelstoffe sind nur durch anschließende chemische Analytik möglich.

Literatur

HANSESTADT HAMBURG (1993): Handbuch

LfU Ba-Wü (1994): Handbuch

WEGENER (1992): Fachbeitrag

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil K

K2 Immunoassays

Ziel

Halbquantitative bis quantitative Bestimmung von EBTX, Chloroform, MKW, PCP, PAK, Phenolen und Pestiziden im Grundwasser.

Anwendung

Voraussetzungen: Bei quantitativen Bestimmungen mit Immunoassays ist in der Regel die Verwendung eines Photometers erforderlich.

Theorie: Immunoassays eignen sich für den Nachweis und die halbquantitative bis quantitative Bestimmung von verschiedenen organischen Einzelstoffen und Summenparametern. Das Prinzip dieser aus der medizinischen Analytik stammenden Testsysteme beruht auf der selektiven Erkennung eines Stoffes bzw. einer Stoffgruppe. Die Immunoassays nutzen dabei stoffspezifische Antigen-Antikörper-Reaktionen (LFU 1996a). Auf einem Trägermaterial (Röhrchen, Sticks oder Platten) sind entsprechende Antikörper fixiert, die mit markierten Antigenen besetzt sind. Bei Zugabe der Wasserprobe verdrängen die enthaltenen Schadstoffmoleküle die markierten Antigene. Die verbleibenden Antigene werden über eine Farbreaktion nachgewiesen. Über die kolorimetrische oder photometrische Messung der Farbreaktion wird halbquantitativ oder quantitativ die Schadstoffkonzentration bestimmt. Die Antikörper weisen oft eine Querempfindlichkeit für verschiedene strukturverwandte Substanzen auf, die für den summarischen Nachweis von Stoffgruppen ausgenutzt wird. Zugleich erschwert diese Eigenschaft die quantitative Bestimmung, da die Stoffgruppen, je nach Herkunft, bezüglich des Anteils der Leitsubstanz sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein können (LFU 1996b).

Praxis: Bei der Vor-Ort-Bestimmung sind zwei Kategorien von Testkits zu unterscheiden: Schnelltests mit kolorimetrischem Farbvergleich erlauben eine rasche halbquantitative Bestimmung der Schadstoffgehalte. Systeme mit photometrischer Auswertung erzielen gut reproduzierbare quantitative Ergebnisse. Die Tests können mit einem mobilen Feldlabor durchgeführt werden. Notwendiges Zubehör wird zum Teil mit den Testkits mitgeliefert (z.B. Kalibrier-Stammlösungen, Pipetten, Enzymkonjugat), Laborgeräte wie Waagen, Photometer etc. müssen selbst gestellt werden. Daneben gibt es stationäre Meßsysteme, die automatisch arbeiten und eine kontinuierliche Bestimmung von Schadstoffen, etwa von Pestiziden, ermöglichen.

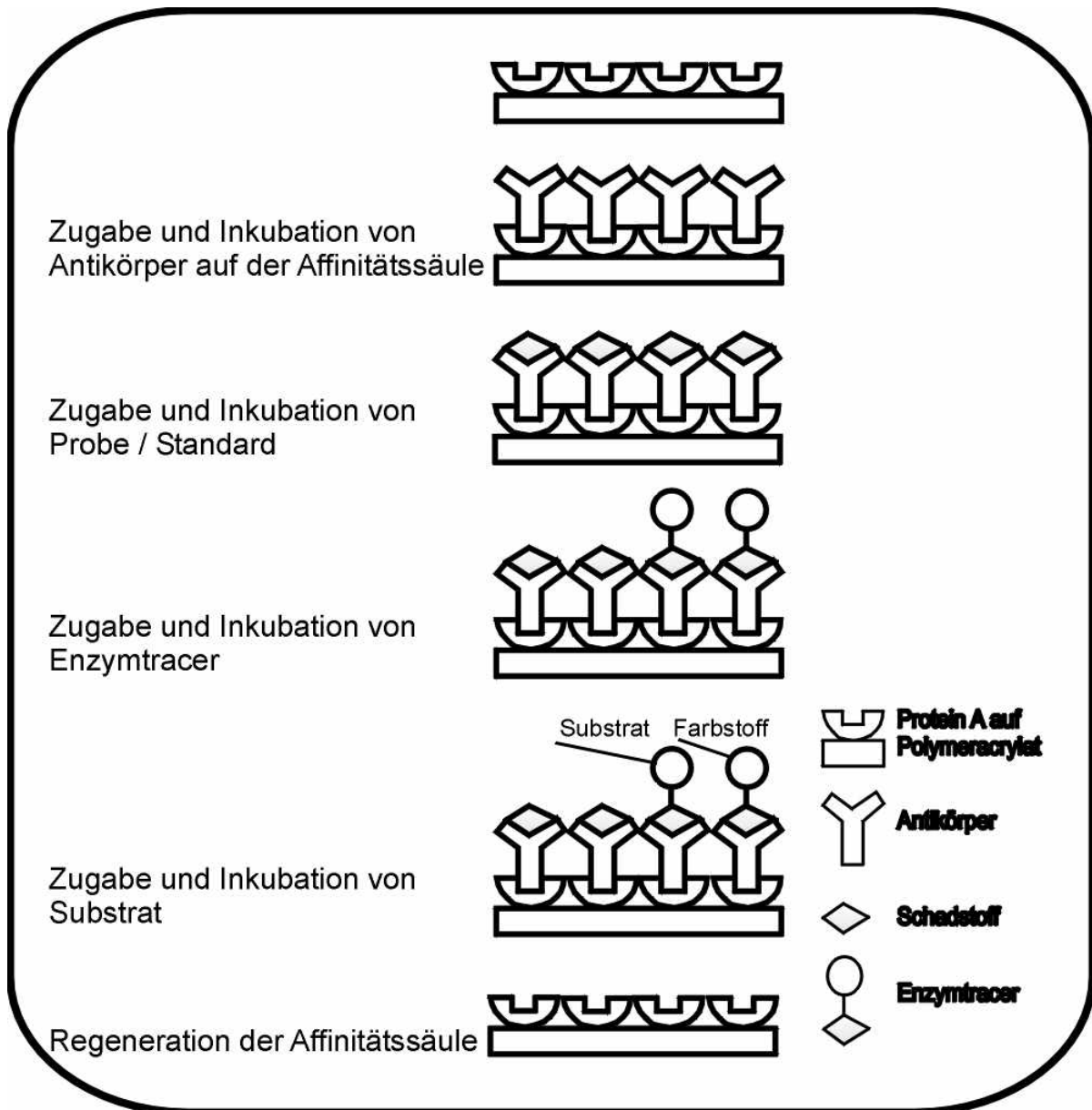


Abb. K 2: Schematische Darstellung des Immunoassay-Meßprinzips in einem FIA System (nach Firmenprospekt meta)

Das Meßprinzip basiert auf einem Fließinjektionsanalyse-System (FIA) und ist in Abbildung K2 schematisch dargestellt.

Kosten / Aufwand

Immunoassays können durch angelerntes Personal angewandt werden. Je nach System lassen sich zwei bis fünfzehn Tests pro Stunde durchführen. Die Kosten liegen bei 20,- DM bis über 100,- DM pro Messung. Plattentests für große Meßreihen sind meist günstiger.

Bewertung

Quantitative Bestimmungen mit Immunoassays liefern schnelle Ergebnisse bei Nachweisgrenzen im ppm bis sub-ppb Bereich. Aufgrund von Querempfindlichkeiten ist die Zuverlässigkeit der Ergebnisse teilweise eingeschränkt. Immoassays sind eine kostengünstige Ergänzung zur herkömmlichen Analytik und eignen z.B. zur Reduzierung des Umfanges der Laboanalytik.

Automatisch arbeitende FIA-Systeme, die auf dem Prinzip der Immunoassays beruhen, werden derzeit in Praxistests für die kontinuierliche Messung von Pestiziden erprobt.

Literatur

LFU (1996a): Literaturstudie

LFU (1996b): Fachbericht

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil K

Literatur zu Teil K

HANSESTADT HAMBURG (1993):

Erfahrungen mit biologischen Wirkungstests bei der Untersuchung von Wasser- und Bodenverunreinigungen; Hamburger Umweltberichte 43/93

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1994):

Altlastenerkundung mit biologischen Methoden, Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 13

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1996b):

Literaturstudie Vor-Ort-Analytik.- Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung 28/96, 90S.; Karlsruhe

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1996b):

Vergleichende Prüfung von Vor-Ort-Analytik-Geräten in Sinsheim am Modellvorhaben ehemalige Fa. Reinig.- Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung 23/96, 35 S.; Karlsruhe

WEGENER, I. (1992):

Einsatzmöglichkeit von Biotests zur Abschätzung des Gefährdungspotentials von Grundwasser aus dem Altlastenbereich; in: STEINHÄUSER & HANSEN (Hrsg.): Biologische Testverfahren, Schriftenreihe der Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene

L Sonstige Methoden

L1 Datensammler

Ziel

Automatische digitale Registrierung von vor Ort anfallenden Meßwerten wie Grundwasserstand und -beschaffenheit in Meßstellen; Schüttung und Beschaffenheit von Quellen.

Anwendung

Voraussetzung: Grundwassermeßstelle mit einem Mindestdurchmesser von 50 mm. Schaltschrank o.ä. für den Einbau bei externen Datensammlern.

Theorie: Datensammler werden zur automatischen digitalen Erfassung von vor Ort anfallenden Meßdaten wie hydrologischen oder chemisch-physikalischen Meßwerten eingesetzt. Sie sind gekoppelt an einen Meßwertgeber (Sensor), der das Meßsignal an den Datensammler weitergibt. Zu unterscheiden sind Einkanal- und Mehrkanaldatensammler, die je nach Ausstattung bis zu 16 verschiedene Parameter gleichzeitig registrieren können. Multifunktionale Datensammler ermöglichen darüber hinaus teilweise ereignisabhängige Fernsteuerung von Geräten oder Prozessen bzw. können mit automatischer Meßwertansage und Datenfernübertragung über Funk- oder Telefonnetz gekoppelt werden. Zum Einsatz kommen heute vorwiegend Datensammler mit autarker Energieversorgung, die einen Einsatz unabhängig von externer Stromversorgung ermöglichen.

Aufbau und Funktion: Der Datensammler empfängt, verarbeitet und speichert das Meßsignal des Meßwertgebers im eingestellten Meßzyklus. Zur digitalen Aufzeichnung muß das Meßsignal bei analogen Meßwertgebern zunächst mit einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert werden.

Der Datensammler besteht aus einem Prozessor für die elektronische Steuerung, einem fest eingebauten oder transportablen Datenspeicher (z.B. Speicherkarte) und einer Schnittstelle für den Anschluß des Auslese- und Bediengerätes.

Manche Datensammler bieten zusätzlich die Option, den Meßwert abhängig von der Unter-/Überschreitung eines bestimmten Grenzwertes oder Gradienten (sog. Ereignissteuerung) abzulegen. Weitere Funktionen des Datensammlers sind (je nach Gerätetyp): Ablegen von Kontrollwerten und Kommentaren, Umrechnung des Signals in dimensionsgetreue Meßwerte, ereignisgesteuerte Auslösung bestimmter Funktionen wie Alarmauslösung etc.

Mehrkanal-Datensammler, die Meßwerte von verschiedenen Meßstellen zentral aufzeichnen können, werden meist außerhalb der Grundwassermeßstelle, etwa in einem Schaltschrank, einer Brunnenstube o.ä. untergebracht. Bei kompakter Bauweise kann der Datensammler in die Grundwassermeßstelle eingebaut werden. Bei manchen Gerätetypen ist der Sammler in

einem gemeinsamen Gehäuse mit dem Meßwertgeber untergebracht und taucht in das Meßmedium ein.

Mit der Auslese- und Bedieneinheit wird der Datensammler programmiert, aktiviert und die Meßdaten ausgelesen. Je nach System ist sie in einem eigenen separaten Handgerät oder in einem gemeinsamen Gehäuse mit dem Datenlogger untergebracht. Bei manchen Systemen kann für die Steuerung und den Datentransfer ein mobiler PC (Laptop) direkt an den Datensammler angeschlossen werden.

Praxis: Der Datensammler wird innerhalb (bei Kompaktgeräten oder kompakten Meßsystemen) oder außerhalb der Grundwassermeßstelle installiert. Mit der Bedien- und Ausleseeinheit wird die Verbindung zum Datensammler hergestellt, das System programmiert und aktiviert. Bei der Programmierung werden je nach Gerät Meßintervalle, Grenzwerte, Startzeit der Meßreihe, Kontrollwerte, Stammdaten etc. eingegeben. Beim Auslesen werden die abgespeicherten Daten auf fest eingebaute oder mobile Datenträger des Auslese- und Bediengerätes überspielt und zur weiteren Verarbeitung in den Büro- oder zentralen Meßnetzrechner eingelesen. Der Datensammler muß, insbesondere bei langfristigen Einsätzen, in regelmäßigen Abständen auf Funktionstüchtigkeit geprüft und ausgelesen werden.

Kosten / Aufwand

Datensammler werden als separate Geräte oder als Teil kompletter Meßsysteme je nach Ausstattung und Hersteller ab DM 3.000,- angeboten.

Der Personalaufwand für Installation, Betrieb und Auslesen ist gering verglichen mit analogen Schreibgeräten oder diskontinuierlicher Messung. Dies gilt nicht für die übrigen, ggf. störanfälligeren Teile eines kompletten Systems.

Bewertung

Im Gegensatz zu diskontinuierlichen Messungen ermöglicht der Einsatz von Datensammlern eine nahezu lückenlose Überwachung der anfallenden Messungen. Auf dem Markt werden ausgereifte und preisgünstige Geräte mit ausreichender Speicher- und Batteriekapazität für lange Meßreihen angeboten.

Literatur

DVWK (1994): Fachbuch
BARCZEWSKI et.al. (1995): Studienbericht

Ausführliches Literaturverzeichnis siehe Kapitel: Literatur zu Teil L

Literatur zu Teil L

DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (1994):
Grundwassermeßgeräte.- DVWK Schriften, Heft 107, 241 S; Bonn

BARCZEWSKI, B., JACOB, B., KEIM, B. (1995):

Pilotstudie zum qualitativen und quantitativen Quellmeßnetz des Landes Baden-Württemberg -
(Resümee) Technischer Bericht der Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau Nr. 94/23 (HG
211); Stuttgart

Abbildungsverzeichnis

Abb. A1: Schemadarstellung eines Reihenmeßfluges.....	3
Abb. A2: Geologisches Blockbild von Baden-Württemberg	7
Abb. B1: Kleinbohrung	9
Abb. B2: Bohren mit direkter Spülung (Rotarybohren).....	12
Abb. B3: Beispiel für die Darstellung von Bohrprofilen	16
Abb. B4: Schematischer Aufbau einer Kleinmeßstelle.....	19
Abb. B5: Regelausbau einer Grundwassermeßstelle im ungespannten Grundwasserleiter	22
Abb. C1: Mischwasserentnahme.....	25
Abb. C2: Aufspaltung des Grundwasseranstroms zu einer Meßstelle in zwei Komponenten.....	29
Abb. D1: Beispiel eines Grundwassergleichenplans.....	32
Abb. D2: Schema des Abflußvorgangs	35
Abb. E1: Parameter der Pumpversuche in gespanntem und ungespanntem Grundwasser	39
Abb. E2: Schematische Darstellung Doppelpacker-Testgarnitur	42
Abb. E3: Schematischer Druckverlauf während eines PiT.....	45
Abb. E4: Schematischer Druckverlauf während eines DST	48
Abb. E5: WD-Versuch mit Einfachpackern und Doppelpackern	51
Abb. E6: Apparativer Aufbau eines Einschwingversuches	54
Abb. E7: Fluid-Logging Felddaten aus einer Bohrung	57
Abb. E8: Schemadarstellung eines Open-End-Tests	60
Abb. E9a: Meßstellennetz eines Markierungsversuches.....	64
Abb. E9b: Darstellung einer Tracerdurchgangskurve	66
Abb. E10: Siebkurve eines Korngemisches	69
Abb. E11: Versuchsanordnungen Permeameteranalyse	72
Abb. F1a: Bahnlinien auf Basis einer analytischen Lösung eines Strömungsfeldes zwischen einem Infiltrationsbrunnen und einem Entnahmebrunnen.....	75
Abb. F1b: Schematischer Vergleich von realer und simulierbarer Konzentrationsverteilung..	78
Abb. G1: Gebräuchliche Meßpunktanordnung der geoelektrischen Kartierung	80
Abb. G2: Beispiel für eine Sondierkurve und Interpretation mit berechneter Modellkurve nach einer Tiefensondierung in Schlumbergeranordnung.....	83
Abb. G3: Einfluß des Tongehaltes eines Sandes auf den spezifischen Gleichstromwiderstand	87
Abb. G4: Eigenpotentialmessung im Abstrombereich einer Deponie	90
Abb. G5: Prinzip des FEM-Induktionsmeßverfahrens	92
Abb. G6: Ergebnis refraktionsseismischer Messungen am Modellstandort Mühlacker	95
Abb. G7: Meßprinzip des reflexionsseismischen Verfahrens	98
Abb. H1: Wirkungsweise eines Flowmeters	101
Abb. H2: Beispiel einer Temperaturmessung im Bohrloch	104
Abb. H3: Schematische Darstellung eines SAL- und TEMP-Logs einer Festgesteinsbohrung im Umfeld einer bestehenden Deponie	107
Abb. H4: Beispiel für einen Gamma-Ray-Log im Oberen Muschelkalk	110
Abb. H5: Schematische Darstellung eines CAL- und FLOW-Logs einer Festgesteinsbohrung im Umfeld einer bestehenden Deponie	113
Abb. H6: Ausbaukontrolle in einer Grundwassermeßstelle unter kombiniertem Einsatz von GRL, FEL und DL	116
Abb. H7: Beispiel für eine Ermittlung der Porosität aus dem Sonic-Log (SV)	120

Abb. I 1: Funktionsschema einer Drucksonde (nach DVWK 1994).....	140
Abb. I 2: Schematischer Aufbau eines faseroptischen Meßsystems (aus: BÜRCK 1994) ...	143
Abb. I 3: Leitfähigkeitssonde mit 4poliger Elektrodenanordnung und integriertem Temperatursensor (aus: Firmenprospekt WTW)	146
Abb. J 1: Schematische Darstellung eines Sorbermoduls (nach Firmenprospekt GORE Associates GmbH)	150
Abb. J 2: Aufbau eines photochemisch arbeitenden Meßsystems für leichtflüchtige organische Stoffe (aus: Firmenprospekt PREUSSAG GmbH).....	152
Abb. J 3: Filterphotometer für Küvettentests (aus: Firmenprospekt MERCK).....	155
Abb. J 4: Funktionsprinzip von ionenselektiven Elektroden.....	157
Abb. J 5: Schema des Meßsystems.....	160
Abb. J 6: Schematischer Aufbau einer membranbedeckten Sauerstoffmeßstelle nach CLARK (aus: Firmenprospekt WTW)	163
Abb. K 1: Überlebensrate von Fischembryonen nach Belastung mit Wasserproben	167
Abb. K 2: Schematische Darstellung des Immunoassay-Meßprinzips in einem FIA System (nach Firmenprospekt meta)	169

Indexverzeichnis

D		
Dichtemessung.....	118	
Drucksonde.....	139	
E		
Erkundung Grundwasser		
elektrische Leitfähigkeit	146	
Temperaturmessung.....	145	
Erkundungsmethoden Grundwasser		
Dichtemessung.....	118	
geoelektrische Methoden	147	
Gleichstromverfahren	147	
Neutronenmessung	118	
Sonic-Log	118	
Übersicht der Methoden	138	
Wechselstromverfahren	147	
F		
fachtechnische Kontrolle Grundwasser		
elektrische Leitfähigkeit	146	
geoelektrische Methoden	147	
Gleichstromverfahren	147	
Temperaturmessung.....	145	
Übersicht der Methoden	138	
Wechselstromverfahren	147	
faseroptisches Meßsystem	142	
Filterphotometer	154	
G		
geophysikalische Bohrlochmessung		
Dichtemessung.....	118	
Neutronenmessung	118	
Sonic-Log.....	118	
Temperaturmessung.....	145	
Übersicht der Methoden.....	138	
Wechselstromverfahren	147	
Grundwassererkundung		
elektrische Leitfähigkeit.....	146	
Temperaturmessung.....	145	
Grundwassererkundungsmethoden		
Dichtemessung.....	118	
geoelektrische Methoden	147	
Gleichstromverfahren.....	147	
Neutronenmessung.....	118	
Sonic-Log.....	118	
Übersicht der Methoden.....	138	
Wechselstromverfahren	147	
Grundwassermeßstelle		
Regelausbau	21	
I		
Immunoassay-Meßprinzip.....	168	
ionenselektive Verfahren ohne		
Selbstkalibrierung	156	
K		
Küvettestest	154	
L		
Laserfluoreszenz-Spektroskopie	143	
Leitfähigkeitssonde	145	
N		
Neutronenmessung.....	118	
S		
Sauerstoffmeßstelle.....	162	
Sonic-Log.....	118	
Sorbermodul.....	149	