
Hydrogeologische und hydrogeochemische Untersuchungen in der ungesättigten Zone eines Kiesgrundwasserleiters

Teil I: Entwicklung und Erstellung eines begehbaren Probenahmeschachtes zur Boden-, Wasser- und Luftuntersuchung

Von Broder Merkel, Gabriel Nemeth, Peter Udluft und Winfried Grimmeisen*

Am Lehrstuhl für Hydrogeologie und Hydrochemie der Technischen Universität München wurde eine begehbare Probenahmeschacht geplant und erstellt. Erstmals besteht die Möglichkeit, die ungesättigte Zone eines 12 m mächtigen quartären Aquifers hinsichtlich Saugspannung, Bodengaszusammensetzung und Bodentemperatur zu untersuchen. Mit Hilfe von Saugkerzen werden Sickerwasserproben gewonnen und dabei die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert bestimmt. Die kontinuierliche Aufzeichnung dieser Kenngrößen durch eine automatische Meßdatenerfassung gewährleistet eine zuverlässige Datenbasis über große Zeiträume bei hoher zeitlicher Auflösung. An dem Forschungsprojekt sind Wissenschaftler aus den Bereichen Bodenkunde, Hydrogeologie, Isotopenchemie, Mikrobiologie und Wasserchemie (alphabetische Reihenfolge) beteiligt.

Hydrogeological and hydrogeochemical studies of the unsaturated flow in a gravel aquifer. Part I. Planning and construction of an accessible shaft, enabling the sampling of percolating water and soil gas. At the Department for Hydrogeology and Hydrochemistry of the Technical University, Munich, W. Germany an accessible research shaft was planned and built. For the first time it is possible to study the unsaturated flow from 12 meter thick quaternary aquifer. The pressure head as indicator for the momentary moisture content, as well as the soil gas composition and the soil temperature can be determined. Seepage water is sampled with suction devices and pH and conductivity determinations are done continuously. The frequent determination of these parameters with automatic data processing insures a reliable data bank with high resolution potential over a long period. The research project involves scientists from the fields of soil science, hydrogeology, isotope chemistry, microbiology and water chemistry (in alphabetical order).

1 Problemstellung

Die Qualität des Grundwassers wird entscheidend auf seiner vertikalen Sickerstrecke in der Dreiphasenzone (Feststoff-Grundluft-Wasser) geprägt. Die Steuerung des „Reifeprozesses“ erfolgt durch physikalische, chemische und mikrobiologische Systemabläufe. Diesem wasserungesättigten Boden- und Schotterkörper kommt eine entscheidende Schutz- und Reinigungsfunktion bei der Grundwasserneubildung zu. So

ist auch bei der Diskussion um die Abgrenzung der Schutzzone 2 (engere Schutzzone in Trinkwassergewinnungsgebieten) die Frage nach dem Einfluß der Überdeckung nach wie vor aktuell. Bisher gibt es kaum Forschungsergebnisse,

* Dipl. Geol. B. Merkel, Dipl. Geol. G. Nemeth, Priv. Doz. Dr. P. Udluft und cand. geol. W. Grimmeisen, Lehrstuhl für Hydrogeologie und Hydrochemie der Technischen Universität, Marchionistr. 17, 8000 München 70

die quantitative Aussagen zur Schutzwirkung der Deckschichten machen. Einerseits liegen für die unterschiedlichen geologischen Körper keine Zahlenwerte über Sickergeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Beregnungsintensität vor, andererseits sind geochemische Reaktionen unter Einbeziehung mikrobiologischer Prozesse sowie Fragen des Transports bzw. der Fixierung gelöster Stoffe auf der Sickerstrecke nicht ausreichend geklärt. Wegen der verstärkten Notwendigkeit geowissenschaftlicher Forschung auf diesem Gebiet beginnt die Deutsche Forschungsgemeinschaft in diesem Jahr ein Schwerpunktprogramm mit dem Thema „Hydrogeochemische Vorgänge im Wasserkreislauf in der ungesättigten und gesättigten Zone“.

Mit dieser Problematik im Zusammenhang stehend ist eine Arbeitsgruppe des Sonderforschungsbereichs 81 (SFB 81) der TU München seit 1978 am Institut für Wasserchemie bzw. am Lehrstuhl für Hydrogeologie und Hydrochemie damit befaßt, den Einfluß siedlungsbedingter Faktoren auf Menge und Qualität des Sicker- und Grundwassers in quartären Karbonatschottern zu quantifizieren. Neben der Untersuchung des Eintrags (Niederschlag, anthropogene Komponenten) und des Austrags (Quellen, Grundwasser) liegt der Schwerpunkt nunmehr auf der Untersuchung der ungesättigten Zone. Dieser Bereich wurde bislang nur bis in Tiefen untersucht, die von der Oberfläche aus durch Sonden erreicht werden konnten (1–2 Meter). Bei einem Flurabstand von 10 bis 30 Metern im Untersuchungsgebiet war somit nur ein kleiner Teil der gesamten Sickerstrecke für Untersuchungen und Probenahmen zugänglich. Um diesen bisher nicht untersuchten Bereich der „Tiefensickerung“ zu erfassen, wurde ein *begehrter Schacht* konzipiert, geplant und gebaut, der es gestattet, den Weg des Sickerwassers von der Bodenoberfläche bis zum Grundwasser in Quantität und Qualität zu verfolgen. Insbesondere sollen die Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe und der Spurenstoffe, Isotopengehalte, Sickergeschwindigkeiten, Diffusionskoeffizienten und das Dispersionsverhalten untersucht werden.

2 Hydrogeologische Verhältnisse

Der begehrte Schachtbrunnen liegt im westlichen Teil der aus pleistozänen Kiesen geschütteten Münchener Schotterebene auf dem Gelände des Institutes für Wasserchemie der TU München. Der Grundwasserspiegel liegt bei ca. 12 Metern. Eine 30–50 cm mächtige humusreiche und leicht kiesige Kulturrendzina bildet die Bodenaufgabe. Die 12 bis 13 m mächtigen Karbonatschotter weisen einen Kiesanteil von 80–90% auf. Der Karbonatanteil liegt über 90%, wobei Dolomite und Kalzite im Verhältnis 1:1 vorliegen. Kristallines Material ist mit 5–7% vertreten. An der Basis der Schotter (12,80 m im Versuchsbrunnen) finden sich glimmerhaltige und stark schluffige Tertiärsande. Der Übergang ist durch einen Aufarbeitungshorizont von einigen Dezimetern Mächtigkeit gekennzeichnet. Die Tertiärsande bilden den Grundwasser-Stauhorizont mit k_f -Werten von 10^{-7} bis 10^{-8} m/s [1]. In den darüber liegenden Kiesen mit k_f -Werten von 10^{-2} bis 10^3 [2, 3] erreicht das Grundwasser eine Mächtigkeit von 1 bis 2 Metern. Durch das ausgeprägte Relief der Tertiäroberfläche sind Grundwassermächtigkeiten, Fließrichtungen und Fließgeschwindigkeiten sehr unterschiedlich. Die generelle Fließrichtung ist NE, die durchschnittliche Abstandsgeschwindigkeit beträgt 15 bis 20 m/Tag.

Der relativ homogene Schotterkörper wird gegliedert von Sand- und Rollkieslagen, deren Mächtigkeiten schwanken und nur eine geringe flächenhafte Verbreitung zeigen. Punktuell treten Nagelfluhbänke mit geringer räumlicher

Ausbreitung auf. Im Versuchsbrunnen ist der Kies bis in Tiefen von 7 m weitgehend homogen. Zwischen 7 und 7,5 m tritt eine stark sandige Lage mit einem Kiesanteil von weniger als 40% auf. Zwischen 8 und 10 m finden sich Nagelfluhbänke, die einige Dezimeter Mächtigkeit erreichen, in ihrer horizontalen Ausbreitung aber nicht durchhalten.

3 Rohbauphase

Eine wesentliche Forderung beim Bau des Brunnens war das möglichst ungestörte Einbringen des Brunnenrohres ohne Benutzung einer Hilfsverrohrung. Aus diesem Grunde wurden Asbestzement-Rohre mit einem Innendurchmesser von 1,60 m und je 5 m Länge verwendet. Das Einbringen der Rohre erfolgte durch Ausbaggern im Rohr, wobei das unten angeschärfte Rohr durch sein Eigengewicht nachrutschte (Abb. 1). Der an einigen Stellen verbliebene geringfügige Hohlraum zwischen Rohrwand und Schotterkörper wurde mit Sand gefüllt, um hydraulische Kurzschlüsse entlang der Rohrwand zu vermeiden.

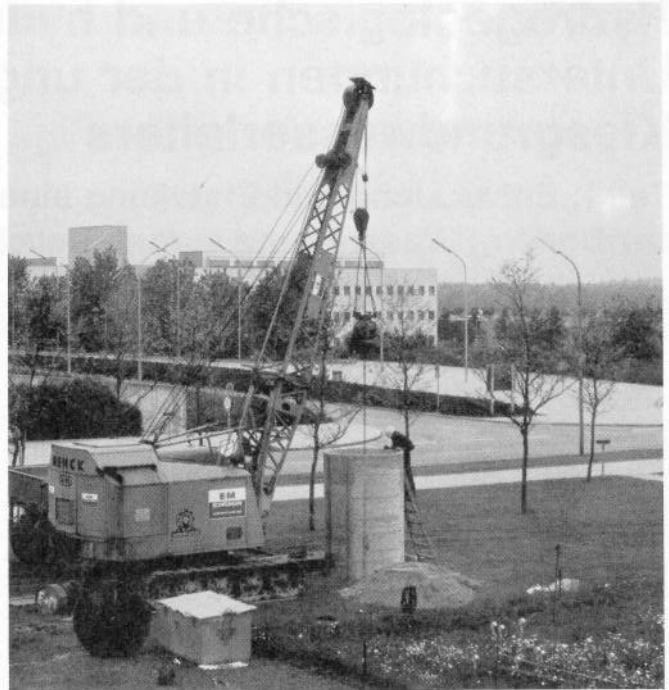


Abb. 1. Einbringen der ETERNIT-Rohre ohne Hilfsverrohrung

In den 10 Meter tiefen Brunnen wurden drei Gitterrostebenen eingebaut und mit senkrecht stehenden Leichtmetalleitern verbunden (Abb. 2). In Tiefen von 0,2/0,5/1/2/3,5/6 und 9 Metern wurden jeweils sieben 1,5 m lange V2A-Mantelrohre (Innendurchmesser: 26 mm; Außendurchmesser: 30 mm) horizontal eingetrieben. Das Einbringen der Mantelrohre erfolgte unter Verwendung eines Innengestänges (Abb. 3) mit Hilfe eines Preßlufthammers. Die Verwendung von 2 Gummi-O-Ringen in Nutringen an der Spitze des Innengestänges erwies sich als notwendig, um das Eindringen von Gesteinsmehl zwischen Gestänge und Mantelrohr zu vermeiden. Ohne Verwendung der O-Ringe war das Ziehen des Innengestänges selbst unter Verwendung eines Ziehgerätes mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Auf Grund des Innendurchmessers des Brunnens von 1,60 m konnten die Mantelrohre nicht in der Gesamtlänge von 1,50 Metern eingerammt werden, sondern nur in Teilstücken von 100 und 50 cm; die Nahtstellen wurden verschweißt.

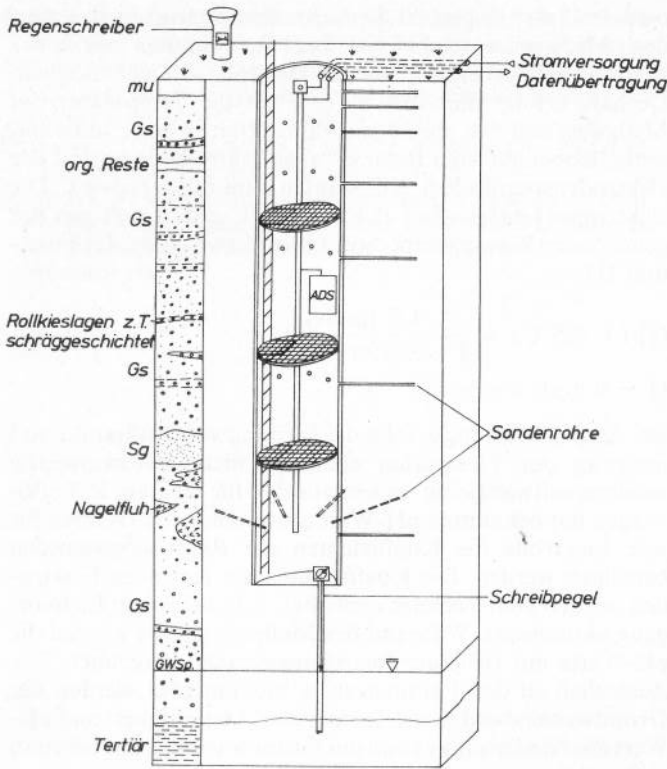


Abb. 2. Profilskizze des begehbaren Schachtbrunnens

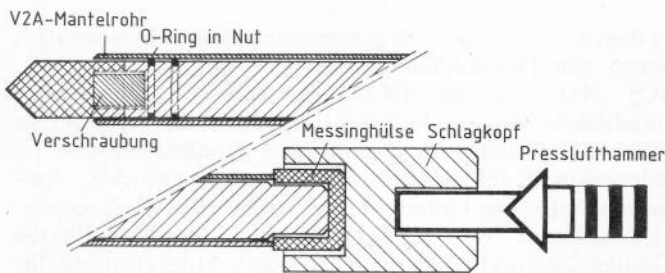


Abb. 3. Prinzipskizze des Innengestänges zum Einrammen der V2A-Mantelrohre zur Aufnahme der Meßsonden

4 Meßeinrichtungen

Im Normalbetrieb werden je Meßebene drei Saugkerzen zur Sickerwassergewinnung, drei Tensiometerkerzen zur Saugspannungsmessung und eine kombinierte Temperatur/Bodengassonde eingesetzt. Die Bauart der Saugkerzen zeigt Abb. 4. Als Kerzenmaterial wird 99,5% Aluminium-Oxid-Sinter (SKA 100 FF der Fa. Haldenwanger) mit einem mittleren Porendurchmesser von $0,5 \mu\text{m}$ verwendet. Diese Kerzen erwiesen sich chemisch als weitgehend neutral [4]. Die Wegführung des Sickerwassers erfolgte in PVC-Schläuchen mit einem Innendurchmesser von 1,5 mm. In kleinen Durchflußmeßgefäßen werden pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur kontinuierlich gemessen. Die Sammlung des anfallenden Sickerwassers erfolgt in Glasflaschen, die in ihrer Höhe unterhalb der Saugkerzenposition variiert werden können. Je nach Position der Probensammelflasche wird durch die hängende Wassersäule im Entnahmeschlauch die an der Kerze anliegende Saugspannung eingestellt.

Für die Tensiometer werden als Keramikkörper Diaphragmakörper (DIAPOR 80/40, Fa. Schuhmacher [5]) verwendet. Die Messung erfolgt mit Hilfe piezoresistiver Drucksensoren der Fa. Honeywell (Abb. 5). Bei dem verwendeten Typ 136 PC

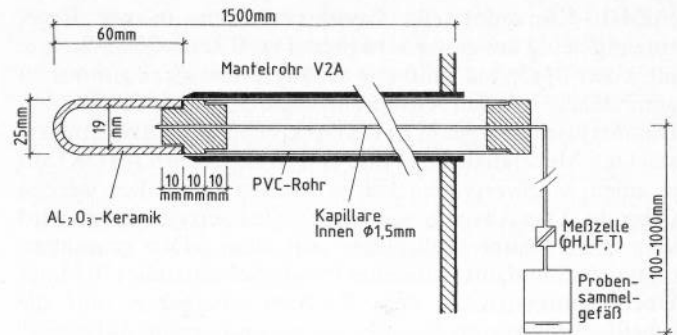


Abb. 4. Prinzipskizze der Saugkerzen zur Entnahme von Sickerwasser

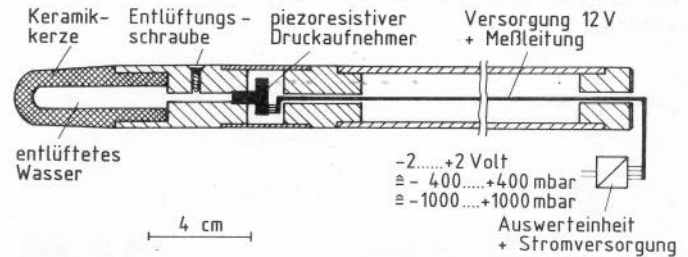


Abb. 5. Prinzipskizze der Druckaufnehmer-Tensiometer

handelt es sich um einen temperaturkompensierten Differenzdruckaufnehmer. Die Meßgenauigkeit (Reproduzierbarkeit einschließlich Hysterese) beträgt $\pm 0,15\%$, bei einem Meßbereich von -400 bis $+400$ mbar (bzw. -1000 bis $+1000$ mbar) entsprechend einem maximalen Fehler von $\pm 0,5$ mbar ($\pm 1,5$ mbar). Die Druckaufnehmer werden mit einer Konstanzspannung von 12 Volt betrieben, der Bereich des Meßsignals beträgt -2 und $+2$ Volt entsprechend -400 bis $+400$ bzw. -1000 bis 1000 mbar. Die Materialkosten für das entwickelte betriebsfertige Tensiometer betragen einschließlich Auswerteinheit ca. DM 250,- pro Stück.

Die Boden- und Wassertemperaturen werden mit Halbleitertemperaturen der Fa. Ultrakust gemessen. Zur Messung der pH-Werte werden Mikroelektroden der Fa. Ingold und zur Leitfähigkeitsmessung Durchflußelektroden vom Typ CDC114 der Fa. Hillerkus verwendet. Die Kohlendioxidmessung der Bodenluft erfolgt durch nicht dispersive Infrarot-Spektrometrie (APBA - 200 E, Fa. Horiba) [6]; die Umschaltung auf die einzelnen Meßstellen geschieht mit Hilfe von Magnetventilen.

5 Meßdatenerfassung

Die Erfassung der Saugspannungen, der Wasser- und Bodentemperaturen, der Leitfähigkeit und des pH-Wertes im Sickerwasser und des Kohlendioxidgehaltes der Bodenluft erfolgt automatisch, während die Probenahme des Sickerwassers sowie spezielle Untersuchungen manuell durchgeführt werden.

Da alle auf dem Markt befindlichen Analog-Daten-Erfassungssysteme nur bedingt für die Aufgabenstellung geeignet waren, wurde im Auftrag des TP A6 von der Fa. PIC GmbH, München, eine automatische Meßdatenerfassung entwickelt und gebaut.

Die Auswahl der Meßstellen zu vorwählbaren Zeiten erfolgt durch einen Microcomputer (CBM 8032). Die Analog-Digital-Wandlung der Meßwerte erfolgt im Untersuchungsschacht mit Hilfe eines 13 Bit Analog-Digital-Converters

(ADC). Konventionelle Geräte erwarten in der Regel eingangsseitig ein genormtes Signal (z. B. 0 bis 20 mA); d. h. für jeden Meßplatz muß ein Meßwertverstärker zur Verfügung stehen. Um hier Kosten einzusparen, wurde das Analog-Datenerfassung-System (ADS) so konzipiert, daß die unverstärkten Meßsignale mit Hilfe von Multiplexern (MUX) auf je einen Meßwertverstärker je Meßart geschaltet werden (Abb. 6). Das Ausgangssignal der Meßwertverstärker wird über den Haupt-Multiplexer auf den ADC geschaltet, digitalisiert und mit Hilfe einer Parallelschnittstelle (70 Meter Übertragungsstrecke) dem Rechner übergeben, auf die jeweilige Meßwertgröße umgerechnet und parallel auf zwei 5'' Disketten geschrieben und auf Drucker protokolliert. Zusätzlich zur Online Statistik (Tagesmittelwerte, Standardabweichungen etc.) können die Daten mit Hilfe des am Institut vorhandenen Statistiksystems STASY [7] sofort ausgewertet werden.

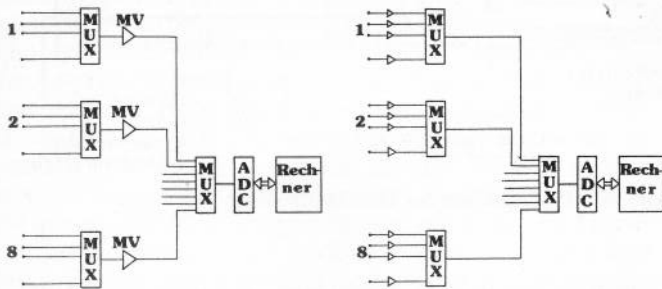


Abb. 6. Prinzipskizzen analoger Datenerfassung
rechts: Je Meßplatz ein Meßwertverstärker
links: Verwendung von nur einem Meßwertverstärker je Meßart

Der verwendete ADC ergibt eine Auflösung des Meßwertes in 4096 Bits. Da das Vorzeichen des Meßwertes vom Rechner abgefragt wird, beträgt die maximale Auflösung bei einem Meßwert, der sowohl positive als auch negative Werte (z. B.: -2...+2 Volt) annehmen kann, 8192 Bit. Die Auflösung für die einzelnen Meßgrößen zeigt die nachfolgende Tabelle.

Tab. 1. Meßbereiche, Ausgangssignal und Auflösung der automatisch erfaßten Meßgrößen

	Meßbereich	Ausgang	Auflösung 1 Bit =
Temperatur	-10/+30 °C	0... 20 mA	0,01 °C
Leitfähigkeit	0/1 000 µS	0... 1 V	0,25 µS/cm
pH-Wert	0/14 pH	0... 1,4 V	0,004 pH
Druck	-0,4/0,4 bar	-2...+2 V	0,09 mbar
	-1,0/1,0 bar	-2...+2 V	0,20 mbar
Kohlendioxid	0/5 Vol. %	0... 20 mA	0,001 Vol. %

Für die Meßgrößen Temperatur und Druck werden standardisierte Meßwertempfänger verwendet, bei denen das vom Meßwertverstärker gelieferte Ausgangssignal unabhängig vom jeweils anliegenden Meßwertempfänger direkt proportional zum Meßwert ist.

Für die Kohlendioxid-Messung werden die einzelnen Bodengasprobenahmestellen mit Hilfe von Magnetventilen auf das Meßgerät geschaltet. Die Umsetzung des nichtlinearen Ausgangssignals des Meßwertverstärkers erfolgt softwareseitig.

Die verwendeten Leitfähigkeitsmeßzellen weisen keine einheitliche Elektrodenkonstante auf. Der Faktor der verwendeten Elektroden beträgt $1,5 \pm 15\%$ und wird normalerweise ebenso wie die Temperatur des Meßgutes am Leitfähigkeits-

meßverstärker eingestellt. Diese hardwareseitige Eichung auf den Meßwertempfänger ist bei Verwendung nur eines Meßwertverstärkers für alle LF-Meßplätze nicht möglich. Deshalb erfolgt die Abstimmung auf die Temperatur des Meßgutes und den jeweiligen Meßwertempfänger softwareseitig, wobei der vom Rechner abgefragte Meßwert mit der elektroden-spezifischen Konstanten multipliziert wird. Die elektrische Leitfähigkeit (LF) bei 25 °C ergibt sich aus der gemessenen Wassertemperatur unter Verwendung der Funktion (1).

$$(1) \text{ LF } (25^\circ\text{C}) = \frac{\text{LF (mess)}}{1 + 0.0196 (T - 25)}$$

(T = Temperatur in °C)

Bei der pH-Messung erfolgt die Eichung von Nullpunkt und Steigung der Elektroden ebenfalls nicht hardwareseitig sondern softwareseitig, indem aus den für mehrere Pufferlösungen mit bekannten pH-Wert gemessenen mV-Werten für jede Elektrode die Koeffizienten der Regressionsgeraden berechnet werden. Die Koeffizienten der einzelnen Elektroden werden vom Rechner verwaltet, d. h. bei jedem Eichvorgang aktualisiert. Während des Meßprogramms werden die pH-Werte mit Hilfe der Regressionsgeraden berechnet.

Zusätzlich zu den Parametern je Meßhorizont werden der Grundwasserstand sowie Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert des Niederschlags und des Grundwassers gemessen und aufgezeichnet.

6 Untersuchungsprogramm

In dem durch Saugkerzen gewonnenen Sickerwasser werden neben den Hauptinhaltsstoffen Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- und HCO_3^- die Neben- und Spurenbestandteile B; Mn, Fe; Cu, Zn, Cd, Hg, Pb bestimmt [8]. Ferner sollen die Gehalte an organischem Kohlenstoff und an chlorierten Kohlenwasserstoffen ermittelt werden. Aufbauend auf ersten Untersuchungen [9] werden die Isotopengehalte (u. a. ^{13}C , ^{14}C , T_2O und D_2O) der drei Phasen Gestein, Luft und Wasser von Mitarbeitern des Institutes für Radiohydrometrie (Prof. Dr. Moser) der Gesellschaft für Strahlenforschung, Neuherberg, untersucht und ausgewertet. Mit dem Lehrstuhl für Forstwirtschaft und Bodenkultur der Universität München (Prof. Dr. Kreutzer) besteht eine enge Zusammenarbeit, um dem z. T. bodenkundlichen Anteil der Problematik gerecht zu werden. Eine Zusammenarbeit mit Mikrobiologen ist für die nahe Zukunft geplant.

Für die finanzielle Unterstützung bei dem Bau des begehbaren Schachtbrunnens im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojektes danken wir den Firmen ETERNIT AG, ETSCHER & MEYER Bohr GmbH und der M. WIMMER GMBH.

Eingegangen: 14. 4. 1982

Literaturverzeichnis

- [1] Gebhardt, P.: Die geologischen und hydrologischen Verhältnisse beim Münchener U-Bahnbau. Unveröff. Dissertation. 143 S. TU München 1968
- [2] Schirm, E.: Die hydrogeologischen Verhältnisse der Münchener Schotterebene östlich der Isar. Beitrag zur hydrologischen Dekade der UNESCO. 139 S. Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde München 1968
- [3] Udluft, P.: Natürliche Grundlagen der Grundwasserneubildung und Grundwasserbeschaffenheit im Bereich der Münchener Schotterebene, insbesondere im Raum Harlaching. Vortragsveranstaltung vom 14. Februar 1979. Schriftenreihe des Sonderforschungsbereiches 81 der TU München, S. 53 - 63. München 1979

- [4] *Bittersohl, J.* und *Nemeth, G.*: Probenahme von Sickerwässern aus Böden und quartären Kiesen der Münchener Schotterebene mit Hilfe keramischer Saugkerzen. Vortragsveranstaltung vom 9. Juli 1981. Schriftenreihe des Sonderforschungsbereiches 81 der TU München. S. 15–24. München 1981
- [5] *Renger, M.*: Keramische Zelle für Tensiometer. Unveröff. Anleitung zum Bau von Tensiometern 1978
- [6] *Merkel, B.*: Methoden zur Gewinnung von Grundluftproben. Vortragsveranstaltung vom 9. Juli 1981. Schriftenreihe des Sonderforschungsbereiches 81 der TU München. S. 3–14. München 1981
- [7] *Faust, A., Kunert, H.* und *Merkel, B.*: STASY Statistiksystem für Micro-Computer. Programmbeschreibung. München 1981
- [8] *Frimmel, F. H.*: Chemisch – Analytische Bestimmung von Metallionen im Sickerwasser und im Grundwasser. Vortragsveranstaltung vom 9. Juli 1981. Schriftenreihe des Sonderforschungsbereiches 81 der TU München. S. 25–39. München 1981
- [9] *Eichinger, L.* und *Merkel, B.*: Untersuchungen zum Kohlenstoffhaushalt der ungesättigten und gesättigten Zone in einem Karbonatschotter. – Methoden und erste Ergebnisse. GSF-Bericht R 290, Neuherberg bei München: 113–132 (1982)