

Methodische und regionale Beiträge zur Auswertung von Umweltisotopendaten in der Hydrogeologie

Methodical and Regional Contributions to the Interpretation of Environmental Isotope Data in Hydrogeology

J. RICHTER¹⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	90
2. Lumped Parameter Modelle zur Auswertung von Umweltisotopendaten in porösen Grundwasserleitern im stationären Zustand.....	92
2.1. Das grundlegende Konzept	92
2.2. Einzelmodelle	93
2.3. Modellkopplungen	93
2.4. Sensitivitätsuntersuchungen	96
2.4.1. Die Inputfunktion	96
2.4.1.1. Methodik.....	96
2.4.1.2. Ergebnisse	99
2.4.1.3. Schlußfolgerungen.....	101
2.4.2. Die Meßwerte	104
2.4.2.1. Methodik.....	104
2.4.2.2. Ergebnisse	106
2.4.2.2.1. Das Exponentialmodell.....	109
2.4.2.2.2. Das Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 2,0$	109
2.4.2.2.3. Das Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 0,02$	109
2.4.2.3. Schlußfolgerungen.....	110
3. Fallbeispiel für humide Gebiete	111
3.1. Geographische und geologische Kurzbeschreibung des Untersuchungsgebietes	111
3.2. Hydrogeologie und Hydrologie des Untersuchungsgebietes.....	113
3.3. Auswertung von Tritiumdaten	116
3.3.1. Flache Mineralwasserquellen.....	119
3.3.2. Bohrbrunnen.....	123
3.3.3. Zusammenfassung.....	126
4. Möglichkeiten und Grenzen der Neubildungsabschätzung aus Grundwassertritiumdaten in ariden Gebieten anhand eines Fallbeispiels	128
4.1. Problemstellung und Einführung in das Untersuchungsgebiet.....	128
4.1.1. Problemstellung.....	128

¹⁾ Dr. J. RICHTER, HGC Hydro-Geo-Consult GmbH, Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg.

4.1.2. Klima und Hydrologie.....	129
4.1.3. Grundzüge der geologisch-hydrogeologischen Situation	132
4.2. Durchgeführte Beprobungen und Einschätzung des gewonnenen Datenmaterials	134
4.3. Grundsätzliche Bemerkungen zur Grundwasserneubildung unter ariden Bedingungen	135
4.4. Auswertung der isotopischen und hydrogeochemischen Daten	135
4.4.1. Bisherige isopenhydrogeologische Untersuchungen in der Mongolei	135
4.4.2. Auswertung der Deuterium- und ¹⁸ O-Werte.....	136
4.4.3. Bildung der Tritiuminputfunktion.....	138
4.4.4. Abschätzung der Grundwasserneubildung mit „nicht- isotopischen“ Methoden.....	141
4.4.5. Abschätzung der Grundwasserneubildung mit Hilfe der Tritiummeßwerte.....	141
4.4.5.1. Auswertung der Tritiumdaten der 1988 beprobten Aufschlüsse	143
4.4.5.2. Auswertung der Tritiumdaten für die 1990 beprobten Aufschlüsse	146
4.4.6. Diskussion der Radiokohlenstoffmeßwerte.....	149
4.4.7. Zur Auswertung der hydrochemischen Daten	154
4.4.7.1. Methodik.....	154
4.4.7.2. Ergebnisse	157
5. Anhang.....	164
5.1. Das Computerprogramm MULTIS.....	164
5.2. Das Computerprogramm BMI.....	166
5.3. Daten zu Abschnitt 4.....	170
5.4. Geologische „Übersichts“karte zu Abschnitt 4.	183
5.5. Verwendete Formeln	184
5.5.1. Berechnung der potentiellen Verdunstung.....	184
5.5.2. Ermittlung der Tritiuminputfunktion nach LEWIS.....	184
5.5.3. Berechnung des Fehlers der Tritiummessung	185
5.6. Abkürzungen, Formelzeichen und Symbole.....	185
Zusammenfassung	186
Literatur.....	188
Summary	192
Dank	193

1. Einleitung

Im Zusammenhang mit einer Reihe von hydrogeologischen Fragestellungen gilt den im Wasser enthaltenen stabilen und radioaktiven Nukliden, die man auch als Umwelt nuklide oder Umweltisotope bezeichnet, besonderes Interesse. Für die Klärung der Genese der Grundwässer sind z. B. die Verhältnisse stabiler Isotope der Elemente des Wassermoleküls oder im Wasser gelöster Stoffe (z. B. ²H/¹H, ¹⁸O/¹⁶O, ¹³C/¹²C) geeignete Indikatoren. Aufgrund ihres radioaktiven Zerfalles

können Radionuklide wie Tritium, Radiokohlenstoff, ^{85}Kr , ^{39}Ar u. a. Auskunft über die mittlere Verweilzeit eines Wassers im Aquifer geben. Außerdem können mit Hilfe solcher Nuklide Beiträge im Zusammenhang mit Fragen der Grundwasserdatierung, der Geschütztheitsbewertung von Grundwasservorkommen, der Grundwasserneubildung und der Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwassern erbracht werden. Bei entsprechenden Untersuchungen gewonnene Erkenntnisse können zur Beurteilung des Schadstoffverhaltens im Grundwasserleiter genutzt werden.

Aus der Vielzahl und Art der Anwendungen wird deutlich, daß das Instrumentarium der Isotopenmethoden in die Hand jedes Hydrogeologen gehören sollte. In diesem Kontext ist das Anliegen dieser Arbeit zu verstehen.

Für die Anwendung von Umwelteisotopenmethoden ist der fundierten Wahl eines mathematischen Auswertemodells und der Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufes der Tracereintragskonzentration ins Grundwasser (Inputfunktion) Priorität beizumessen. Dafür wurde eine ganze Gruppe von Modellen entwickelt, denen u. a. die Zusammenfassung mehrerer natürlicher Größen in relativ wenigen Modellparametern gemeinsam ist. Dieser Zusammenfassung entspringt der Name „Lumped Parameter“ Modelle (engl.: to lump – zusammenfassen). Die Theorie dieser Modelle ist wohl fundiert und Anwendungen von Einzelmodellen haben sich seit vielen Jahren bewährt.

Die Zielstellung für die vorliegende Arbeit ergab sich vor allem aus folgenden Tatsachen:

1. Obwohl die genannten Einzelmodelle einen relativ großen Bekanntheitsgrad erreicht haben, wird bislang der Auswirkung von Ungenauigkeiten in den Eingangsgrößen (Inputfunktion, Meßfehler) nur relativ wenig Aufmerksamkeit geschenkt.
2. Die Anwendung dieser Einzelmodelle ist nicht selten unbefriedigend, weil sie die Realität unvollkommener widerspiegeln, als es der hydrogeologische Kenntnisstand zuläßt.

Die sich aus diesen beiden Aspekten ergebenden Aufgabenstellungen sind praktisch nur durch die Nutzung entsprechender Werkzeuge zu lösen. Intensive Recherchen nach solchen Tools blieben erfolglos, sodaß sich eine dritte Motivation ergab:

3. Die Umsetzung von Lumped Parameter Modellen war im wesentlichen auf einen kleinen Personenkreis in wissenschaftlichen Einrichtungen beschränkt, in denen individuelle Lösungen für die Modellrealisierung erarbeitet worden sind. Die Auswertung von Isotopendaten in der hydrogeologischen Praxis erschöpfte sich in Einzelfällen.

Zur Verbesserung des in den ersten beiden genannten Punkten beschriebenen Zustandes machte es sich also zunächst erforderlich, eine entsprechende Softwarelösung zu erarbeiten. Die Implementierung eines solchen Computerprogrammes ist unerläßliche Voraussetzung zur Lösung der genannten Probleme und stellt einen eigenständigen Beitrag zur Isotopenhydrogeologie dar. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Computerprogramm MULTIS wird beschrieben.

Es ist ein Anliegen der Arbeit, Aussagen zur Empfindlichkeit von Datierungsergebnissen in der Folge veränderter oder verfälschter Eingangsparameter zu treffen. Dies soll sowohl anhand synthetischer Daten für humide Verhältnisse als auch anhand

eines verfügbaren Datensatzes aus der ariden Region eines Entwicklungslandes untersucht werden. Dabei wurde versucht, die Spezifika isopenhydrogeologischer Untersuchungen in ariden Gebieten zu berücksichtigen. Weiterhin soll die Möglichkeit routinemäßiger Anwendungen von Modellkopplungen an einem Praxisbeispiel demonstriert werden.

2. Lumped Parameter Modelle zur Auswertung von Umweltisotopendaten in porösen Grundwasserleitern im stationären Zustand

2.1. Das grundlegende Konzept

Das Wesen von Lumped Parameter Modellen besteht darin, daß räumliche Veränderungen von Eigenschaften des betrachteten Grundwasserleiters ignoriert werden und der Zustand des Systems und verschiedene Eigenschaften als homogen im gesamten System angesehen werden (D. M. HIMMELBLAU & K. B. BISCHOFF, 1968). Dies stellt den Hauptunterschied zur Vielzahl von diskretisierenden Modellierungsverfahren dar und markiert gleichzeitig ein Haupteinsatzgebiet für Lumped Parameter Modelle: Systeme ohne detaillierte konventionelle Beobachtungsergebnisse mit unbekannter Verteilung von Parametern.

Die Grundlagen der Theorie von Lumped Parameter Modellen wurden in mehreren Arbeiten detailliert dargelegt, u. a. von A. ZUBER (1985, 1986). An dieser Stelle sollen Modelle betrachtet werden, die auf die gesättigte Zone im stationären Zustand und zur Lösung der indirekten Aufgabe anwendbar sind.

Für Tracer, die mit dem Volumenstrom der Grundwasserneubildung ins System gelangen, gilt dabei folgende Beziehung:

$$C_{\text{out}}(t) = \int_0^t C_{\text{in}}(t-t') \exp(-\lambda t') g(t') dt', \quad (1)$$

wobei

t die kalendarische Zeit,
t' die Verweilzeit des Tracers,
 C_{out} die Tracerkonzentration am Systemausgang (Output),
 C_{in} die Tracerkonzentration am Systemeingang (Input),
 $g(t')$ die Wichtung- oder Systemantwortfunktion des betreffenden Tracers für einen bestimmten Eingabe-Meß(Entnahme-)-Modus sind.

Für einen idealen Tracer nach A. ZUBER (1986) ist $g(t')$ identisch mit der Verweilzeitverteilungsfunktion des Wassers und deshalb in gleicher Weise normiert; siehe Gl. (2):

$$\int_0^{\infty} g(t') dt' = 1. \quad (2)$$

„Ein idealer Tracer ist eine Substanz, die sich im System – soweit dies die betrachteten Parameter betrifft – genau so verhält wie das getracerte Material, und die mindestens eine Eigenschaft besitzt, die sie vom getracerten Material unterscheidet.“ (A. ZUBER, 1986, S. 5; Übers.: d. A.)

Lumped Parameter Modelle unterscheiden sich voneinander durch ihre Wichtungsfunktion $g(t')$, die die konkreten hydrogeologischen Verhältnisse widerspiegelt.

Das grundlegende Interesse im Auswerteprozess gilt der Bestimmung der Parameter der Funktion $g(t')$, insbesondere dem Hauptparameter mittlere Verweilzeit.

2.2. Einzelmodelle

Im folgenden werden einige der bislang entwickelten und in unterschiedlichem Maße angewandten Lumped Parameter Modelle zusammengefaßt.

Einfache Lumped Parameter Modelle wie das Exponentialmodell (EM), das Linearmodell (LM), das Piston-Flow-Modell (PM) und das Dispersionsmodell (DM) wurden in den 50er und 60er Jahren (S. KAUFMANN & W. F. LIBBY, 1954, H. VON BUTTLAR & W. F. LIBBY, 1955, F. BEGEMANN & W. F. LIBBY, 1957, E. ERIKSSON, 1958, K. H. COATS & B. D. SMITH, 1964) und von P. MALOSZEWSKI & A. ZUBER (1982) eingeführt (siehe Fig. 1 und Tab. 1).

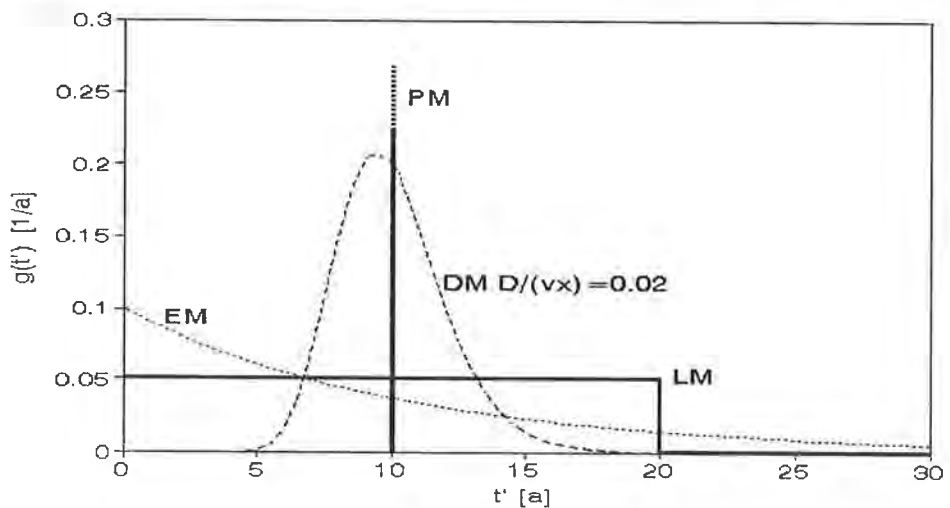


Fig. 1: Wichtungsfunktionen für einfache Lumped Parameter Modelle ($\tau_m = 10 a$).
Weighting functions of simple lumped parameter models ($\tau_m = 10 a$).

Wenn im folgenden das Dispersionsmodell behandelt wird, so wird Bezug genommen auf den C_{FF} -Fall nach P. MALOSZEWSKI & A. ZUBER (1982), wobei F im ersten und zweiten Index den Modus der Tracerinjektion bzw. -messung kennzeichnet. Dabei werden Tracerinjektion und -entnahme als proportional zum Volumenstrom des Grundwassers angenommen. Praktisch bedeutet dies, daß dieses Modell für Fälle anwendbar ist, bei denen der Tracer mit der Grundwasserneubildung injiziert und aus dem Förderstrom eines Brunnens entnommen wird.

2.3. Modellkopplungen

Vom Standpunkt des Hydrogeologen ist die Anwendung dieser einfachen Modelle jedoch oft mit unannehmbaren Idealisierungen verbunden. In solchen Fällen können Kombinationen von Lumped Parameter Modellen zu einer besseren

Annäherung der Modellannahmen an die Realität beitragen. Die Entwicklung des Exponential-Piston-Flow-Modells (EPM) und des Linear-Piston-Flow-Modells (LPM) als **Reihenschaltungen** von jeweils zwei Einzelmodellen durch die Autoren P. MAŁOSZEWSKI & A. ZUBER (1982) waren ein Schritt zur Lösung dieses Problems (Fig. 2).

Annahmen und Grenzen dieser Modelle sind in den zitierten Arbeiten im Detail beschrieben; eine formelmäßige Darstellung dieser Modelle gibt Tab. 1.

Parallelschaltungen sind prinzipiell für eine beliebige Anzahl von Lumped Parameter Modellen nach (3) möglich:

$$C_{\text{out}} = \sum p_i C_{\text{out}_i} \quad (\sum p_i = 1), \quad (3)$$

mit:

C_{out} = resultierender Traceroutput des Gesamtmodells,

C_{out_i} = Output des Teilmodells i ,

p_i = Anteil des Teilmodells i am Gesamtmodell.

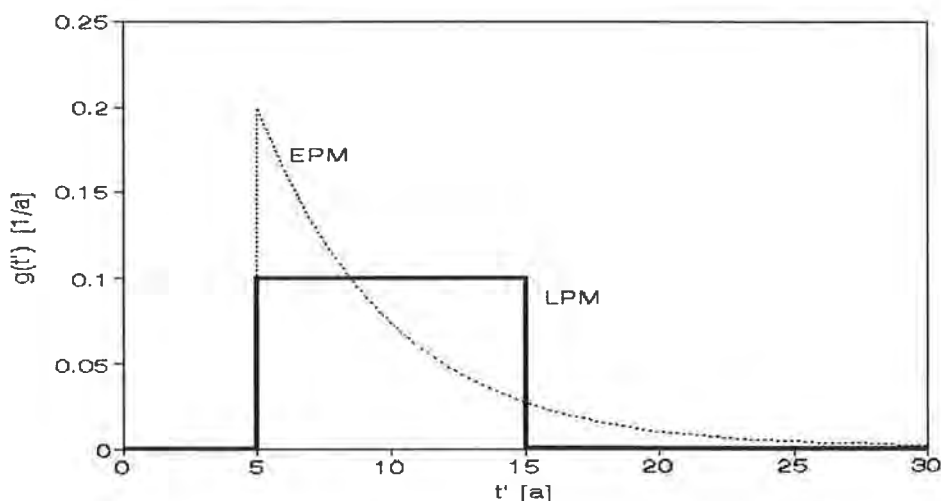


Fig. 2: Verweilzeitverteilungsfunktionen für Reihenschaltungen von Lumped Parameter Modellen ($\tau_m = 10$ a).

Weighting functions of serial combinations of lumped parameter models ($\tau_m = 10$ a).

Solche Kombinationen nähern sich mit steigender Modellanzahl nach ihrem Wesen und der Anzahl der Modellparameter Multi-Box-Modellen und sophisticateden diskretisierenden Modellierungsverfahren (z. B. Y. YURTSEVER & S. BUAPENG, 1992). Ohne umfangreiche zusätzliche hydrogeologische Informationen und eine große Anzahl von Meßwerten – u. U. notwendig für mehrere Tracer – können diese Modelle kaum oder nicht kalibriert werden. In diesen Fällen treten hauptsächlich folgende Fehlerquellen auf:

- a) Die erhaltene Lösung ist in hohem Grade mehrdeutig, d. h., es existieren viele Teillösungen.
- b) Es wird eine gute Anpassung erreicht, jedoch gerät die reale hydrogeologische Bedeutung der Modellparameter außer Kontrolle.

Tab. 1: Wichtungsfunktionen und Parameter verschiedener einfacher und kombinierter Lumped Parameter Modelle (zusammengestellt nach P. MAŁOSZEWSKI & A. ZUBER, 1982). τ = Verweilzeit; τ_m = mittlere Verweilzeit; η = Verhältnis von Gesamtvolumen des Systems : Volumen mit Exponential- bzw. Linearmodell-Regime. D/vx = Dispersionsparameter; D = Dispersionskoeffizient [$m^2 s^{-1}$]; x = Entfernung zwischen Speisungs- und Meßpunkt; v = mittlere Fließgeschwindigkeit, $v = x/\tau_m$ (im Falle von PM: $v = x/\tau$).
 Weighting functions and parameters of several simple and combined lumped parameter models (compiled from P. MAŁOSZEWSKI & A. ZUBER, 1982). τ = residence time; τ_m = mean residence time; η = ratio of total volume of the system : volume with conditions of the exponential model or linear model, respectively. D/vx = dispersion parameter; D = dispersion coefficient [$m^2 s^{-1}$]; x = distance between catchment area and sampling point; v = mean flow velocity, $v = x/\tau_m$ (in case of PM: $v = x/\tau$).

Modell	Wichtungsfunktion $g(t')$	Parameter [übliche Einheit]
PM	$\delta(t' - \tau)$	τ [a]
EN	$\frac{1}{\tau_m} \exp(-\frac{t'}{\tau_m})$	τ_m [a]
LM	$\begin{cases} \frac{1}{2\tau_m} & \text{für } t' \leq 2\tau_m \\ 0 & \text{für andere } t' \end{cases}$	τ_m [a]
DM	$\frac{1}{2t' \sqrt{\pi} \frac{D t'}{vx \tau_m}} \exp\left(-\frac{(1 - \frac{t'}{\tau_m})^2}{4 \frac{D t'}{vx \tau_m}}\right)$	τ_m [a], $\frac{D}{vx}$ [-]
C_{VF} -Fall		
EPM	$\begin{cases} \frac{\eta}{\tau_m} \exp(-\eta \frac{t'}{\tau_m} + \eta + 1) & \text{für } t' \geq \tau_m - \frac{\tau_m}{\eta} \\ 0 & \text{für andere } t' \end{cases}$	τ_m [a], η [-]
LPM	$\begin{cases} \frac{\eta}{2\tau_m} & \text{für } \tau_m - \frac{\tau_m}{\eta} \leq t' \leq \tau_m + \frac{\tau_m}{\eta} \\ 0 & \text{für andere } t' \end{cases}$	τ_m [a], η [-]

Zudem liefern vielparametrische Multi-Box-Modelle oft ähnliche Ergebnisse wie Lumped Parameter Modelle mit wesentlich weniger Parametern (P. MAŁOSZEWSKI & A. ZUBER, 1982, S. 222).

Die praktische Realisierung von Modellkopplungen scheiterte bislang häufig an der im Einzelfall aufwendigen mathematisch-technischen Umsetzung. Das Softwareprogramm MULTIS (J. RICHTER et al., 1992, J. RICHTER et al., 1993, siehe Abschnitt 5.1. und 5.2.) liefert einen Beitrag zur Lösung dieses Problems. Aus obengenannten Gründen wurde die Anzahl der Teilmodelle sowie die Anzahl der durch das Programm gefitteten Parameter auf jeweils zwei begrenzt. In diesem konkreten Falle vereinfacht sich (3) zu

$$C_{out} = p_1 C_{out_1} + (1 - p_1) C_{out_2} \quad (4)$$

Analog zu Gl. (1) gilt dann:

$$C_{out}(t) = \int_0^t C_{in}(t - t') \exp(-\lambda t') (p_1 g_1(t') + (1 - p_1) g_2) \quad (5)$$

Die Normierung der Gesamtverweilzeitverteilungsfunktion bleibt dabei bestehen, wie aus folgenden Beziehungen zu erkennen ist:

$$\int_0^{\infty} g(t') = \int_0^{\infty} (p_1 g_1(t') + (1 - p_1) g_2(t')) dt', \quad (6)$$

$$\int_0^{\infty} g(t') = p_1 \int_0^{\infty} g_1(t') dt' + (1 - p_1) \int_0^{\infty} g_2(t') dt'. \quad (7)$$

Da für die Einzelfunktionen $g_1(t')$ und $g_2(t')$ die Gl. (2) bewiesen und $p_1 \leq 1$ ist, gilt diese Eigenschaft damit auch für die Gesamtverweilzeitverteilungsfunktion $g(t')$.

In diesem Zusammenhang muß angemerkt werden, daß es bislang noch kein Lumped Parameter Modell gibt, das eine dreidimensionale Brunnenanströmung reflektiert und für die Lösung der indirekten Aufgabe bei der Auswertung von Umwelttracerdaten (mit Ableitung einer mittleren Verweilzeit) geeignet ist. Hierin ist sicher ein Aufgabenfeld für zukünftige Arbeiten zu sehen.

2.4. Sensitivitätsuntersuchungen

Die Schlüsselfrage in der Auswertung von Umweltisotopendaten besteht zweifelsohne in der Wahl eines adäquaten Modells und seiner Validierung. Im folgenden Prozeß der Kalibrierung erfolgt oftmals keine Einschätzung der Genauigkeit der gewonnenen Ergebnisse und es herrscht kaum Klarheit über die Beeinflussung des Endergebnisses durch Fehler in den Eingangsgrößen, welche im wesentlichen in der Inputfunktion und in den Meßwerten zu sehen sind.

„Validierung ist der Prozeß der Erlangung der Gewißheit, daß ein Modell eine korrekte Widerspiegelung des Prozesses oder Systems ist, für das es gedacht ist.“ (P. MALOSZEWSKI & A. ZUBER, 1991, S. 5.)

„Modellkalibrierung ist ein Prozeß, in dem die Annahmen und Parameter des Modelles variiert werden, um das Modell den Beobachtungen anzupassen.“ (P. MALOSZEWSKI & A. ZUBER, 1991, S. 5.)

Eine konventionelle Betrachtung dieser Fragen, z. B. unter Einbeziehung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes oder anderer funktionaler Zusammenhänge, stellt sich problematisch dar, da die Inputfunktion nicht als echte Funktion, sondern als Reihe diskreter Werte vorliegt.

Die nachfolgenden Untersuchungen sollen Abschätzungen über Größenordnungen vermitteln. Konkrete Fehlerbetrachtungen sind mit standortspezifischen Werten vorzunehmen. Es wurden drei charakteristische Modellvarianten für die Untersuchungen ausgewählt: das Exponentialmodell und das Dispersionsmodell mit jeweils $D/(vx) = 0,02$ und $D/(vx) = 2,0$.

2.4.1. Die Inputfunktion

2.4.1.1. Methodik

Als Inputfunktion soll hier die zeitliche Entwicklung der Eintragskonzentration eines Umweltisotops ins Grundwasser verstanden werden. Für die verbreitet angewandten Umweltisotope können drei Gruppen von Inputfunktionen nach ihrer Form unterschieden werden:

- vorwiegend peakförmig ausgebildet (z. B. Tritium),
- vorwiegend gleichförmig ausgebildet (z. B. ^{14}C),
- vorwiegend periodisch ausgebildet (z. B. ^{18}O , Deuterium).

Als Beispiel für eine Tritiuminputfunktion wurden Werte aus Freiberg herangezogen.

An dieser Stelle soll untersucht werden, wie sich die Verwendung von Inputfunktionen, die nach unterschiedlichen Verfahren gebildet wurden, auf das Ergebnis der Datierung auswirkt.

Für die verschiedenen Inputfunktionen wurden folgende Werte bzw. Methoden betrachtet:

- I. Die monatliche Tritiumkonzentration im Niederschlag.
- II. Die von T. DINÇER & G. H. DAVIS (1967) eingeführte Methode eines einfachen Infiltrationsmodells, das neben der monatlichen Tritiumkonzentration im Niederschlag die Niederschlagsmenge und einen Infiltrationskoeffizienten $0 \leq \alpha_i \leq 1$ für jeden Monat berücksichtigt. Unter der Annahme eines jährlich konstanten Verhältnisses zwischen Winter- und Sommerinfiltration erhält man einen Koeffizienten $\alpha = \alpha_{4,5,6,7,8,9/10,11,12,1,2,3}$. Dieses Verfahren gehört wohl zu den am häufigsten angewandten. Der Jahresinput setzt sich danach zusammen aus:

$$C_{in} = \frac{\sum_{i=1}^{i=12} \alpha_i P_i C_i}{\sum_{i=1}^{i=12} \alpha_i P_i} \quad (8)$$

wobei P_i die Niederschlagsmenge im Monat i mit der Tritiumkonzentration C_i ist.

Die von J. GRABCZAK et al. (1984) eingeführte Abschätzung der Inputfunktion mit Hilfe stabiler Isotope läßt sich hier einordnen, da dieses Verfahren eine Formel liefert, aus der ebenfalls ein $0 \leq \alpha \leq 1$ abzuleiten ist. Mit $\alpha = \alpha_{4,5,6,7,8,9} = \alpha_{10,11,12,1,2,3} = 1$ ergibt sich ein Wert, der von der IAEA (vgl. u. a. IAEA, 1990, S. XV) als gewichtetes Jahresmittel veröffentlicht wird.

- III. Die von R. LEWIS (1984) entwickelte und später erweiterte Methode, der Monatsmittelwerte für die Lufttemperatur, den Niederschlag, den Wasserdampfdruck und die Tritiumkonzentration im Niederschlag zugrunde liegen (vgl. Abschnitt 5.5.2.).
- IV. Das Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAM nach V. DUNGER (1989, 1992), das eine Vielzahl von Größen berücksichtigt, die die Prozesse der Infiltration, Versickerung und Evapotranspiration beeinflussen. Dazu gehören sowohl Parameter, die die Beschaffenheit der Aerationzone kennzeichnen, wie Mächtigkeit, Bodenart, Nutzungsart, als auch meteorologische Daten: Monatsmittelwerte für Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Sonnenscheindauer. Um das Modell nutzbar zu machen, waren die Modifizierung eines bestehenden Computerprogrammes und die Schaffung eines pre- und postprocessing erforderlich (siehe Abschnitt 5.2.). Unter den Ausgabeparametern von BOWAM sind zur Ableitung der Inputfunktion insbesondere der monatliche Zufluß zum Grundwasser sowie die darin enthaltene Tritiumkonzentration von Bedeutung. Die Ableitung monatlich diskretisierter Inputfunktionen muß leider als fragwürdig gelten, da es nach Auffassung des Autors kein begründetes Verfahren zur Wichtung der Tracerkonzentrationen entsprechend der mengenmäßig unterschiedlichen Monatsbeiträge der Grundwasserneubildung zum Gesamtreservoir gibt. Daher wurde im postprocessing von BOWAM folgende Formel zur Bildung des Jahresinputs umgesetzt:

$$C_{in} = \sum_{i=1}^{i=12} \alpha_i C_i = \sum_{i=1}^{i=12} \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{i=12} R_i} C_i, \quad (9)$$

wobei R_i der Neubildungsbeitrag im Monat i mit der Tritiumkonzentration C_i ist.

Als Beispiel wurden acht Inputfunktionen mit unterschiedlichen Parametern berechnet (Tab. 2), die sowohl extreme (Inputfunktionen 2 und 3) als auch typische Situationen (Inputfunktionen 5–8) repräsentieren.

In Ermangelung eigener detaillierter Untersuchungen wurde für die Tritiuminputkonzentration für die Periode vor 1953 in Anlehnung an D. HEBERT (1990) der Wert von 5 T.U. angenommen. Nach W. D. ROBERTSON & J. A. CHERRY (1989) kann der wahre Wert u. U. darunter liegen. Bei der Betrachtung des Verlaufes der erhaltenen Inputfunktionen (siehe Fig. 3) fällt bereits auf, daß sich die Inputfunktionen 1 bis 4 zwar in der Höhe der Maximalkonzentration des in das Grundwasser eingetragenen Bombenpeaks unterscheiden, eine infiltrationsbedingte zeitliche Verzögerung jedoch nicht berücksichtigt wird. Die Auswirkung dieser Vernachlässigung wird u. a. im folgenden untersucht. Unter Nutzung der acht Inputfunktionen wurde die indirekte Aufgabe für Tritiummeßwerte aus dem Jahre 1990 gelöst.

Tab. 2: Parameter zur Bildung der einzelnen Tritiuminputfunktionen. Für die mit Methode IV (BOWAM) berechneten Inputfunktionen wurde die Nutzungsart „Feld“ verwendet; unter „Mächtigkeit“ wird die der Aerationzone verstanden.

Parameters for forming of the individual tritium input functions. For the input functions calculated using IV (BOWAM) method, the kind of usage „Feld“ (field) was applied; the term „Mächtigkeit“ (thickness) refers to the thickness of the unsaturated zone.

Nr. der Inputfunktion	Methode	Parameter
1	I	Tritiumkonzentration im Niederschlag
2	II	$\alpha_{4,5,6,7,8,9} = 0; \alpha_{1,2,3,10,11,12} = 1; \alpha = 0$
3		$\alpha_{4,5,6,7,8,9} = 1; \alpha_{1,2,3,10,11,12} = 1; \alpha = 1$
4	III	Jahres-Tritiuminputkonzentration = $f(P, R_0, E)$
5	IV	Bodenart: Sand; Mächtigkeit: 2 m
6		Bodenart: Sand; Mächtigkeit: 10 m
7		Bodenart: Lehm; Mächtigkeit: 2 m
8		Bodenart: Lehm; Mächtigkeit: 5 m

Die Untersuchung wurde anhand von vier hypothetischen Meßwerten unter Einbeziehung des Meßfehlers (vgl. Abschnitt 2.4.2.1.) geführt: $1,00 \pm 0,35$ T.U., $5,00 \pm 0,40$ T.U., $10,00 \pm 0,48$ T.U. bzw. $20,00 \pm 0,70$ T.U.

Die aus einem Meßwert resultierende Spanne der mittleren Verweilzeit wurde berechnet, indem jeweils aus dem Meßwert und dem Meßfehler zwei weitere „Scheinmeßwerte“ abgeleitet und dann Lösungen für drei diskrete „Meß-“Werte ermittelt wurden.

Dazu wurde eine modifizierte Version des Programmes MULTIS genutzt. Im Falle mehrerer in Frage kommender Lösungen wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die größere mittlere Verweilzeit berücksichtigt.

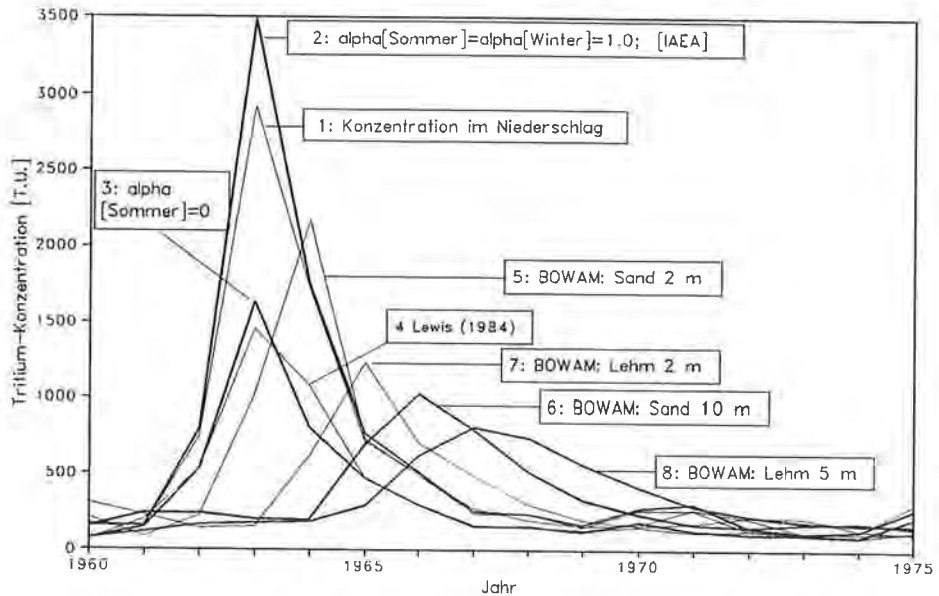


Fig. 3: Verlauf der untersuchten Inputfunktionen im Zeitintervall 1960–1975.
 Shape of the investigated input functions in the time range 1960–1975.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit war es notwendig, die Darstellung der Lösungsbereiche auf ausgewählte Werte (Inputfunktion Nr. 2) zu beschränken und in den übrigen Fällen nur diskrete Lösungen für den Meßwert selbst einzuzichnen.

Da für praktische hydrogeologische Anwendungen der Parameter mittlere Verweilzeit oftmals nur mittelbar von Interesse ist, wurde als korrespondierende Größe der Jungwasseranteil α nach K. FRÖHLICH & R. GELLERMANN (1989) bzw. R. GELLERMANN et al. (1990) in die Darstellung der Lösungen einbezogen. Der Jungwasseranteil α ergibt sich demnach als Integral über die Wichtungsfunktion $g(t')$ des jeweiligen Berechnungsmodells:

$$\alpha = \int_0^{\tau_a} g(t') dt'. \quad (10)$$

Als Jungwasseraltersgrenze τ_a wurde in den Untersuchungen dieser Arbeit ein Wert von 30 Jahren (α_{30}) verwendet. Dieser Wert entspricht etwa dem zeitlichen Abstand zum sogenannten „Bombenpeak“ in der Tritiumkonzentration im Niederschlag.

2.4.1.2. Ergebnisse

Wenn in den nachfolgenden Abbildungen die Datierungsergebnisse für unterschiedliche Modelle gemeinsam enthalten sind, so soll dies keineswegs die Bedeutung der Modellvalidierung mindern. Der Bearbeiter muß vor der Auswertung der Meßwerte Klarheit über die Gültigkeit der Modellannahmen haben. Die Gemeinsamkeit in den einzelnen Grafiken besteht jeweils in demselben der Datierung zugrunde liegenden Meßwert. Die Ergebnisse sind für die einzelnen Modelle streng zu trennen. Bevor zu einigen prinzipiellen Aspekten Stellung genommen wird, seien die Ergebnisse für einzelne Meßwerte kommentiert.

Wie aus Fig. 4 am Beispiel des Meßwertes von $1,00 \pm 0,35$ T.U. zu ersehen ist, weisen die durch die Inputfunktion verursachten absoluten Datierungsunterschiede beim EM hohe Werte auf (1225 a). Sie liegen aber im wesentlichen innerhalb des durch den Meßfehler bedingten Lösungsbereichs und sind nur mit relativ geringen Unterschieden im Jungwasseranteil α_{30} verbunden. Die großen absoluten Unterschiede in der mittleren Verweilzeit dürften für die meisten praktischen hydrogeologischen Belange von geringer Bedeutung sein. Diese Aussagen gelten sinngemäß für das Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 2,0$, wobei die Differenz zwischen Minimal- und Maximallösung bei generell geringerer mittlerer Verweilzeit bedeutend kleiner ist als beim Exponentialmodell (220 a). Beim Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 0,02$ gehen die Abweichungen der Lösungen voneinander über die meßwertbedingte Spannbreite hinaus (Inputfunktion für 5 m Lehm). Für alle gefundenen Lösungen liegt α_{30} unter 5 %.

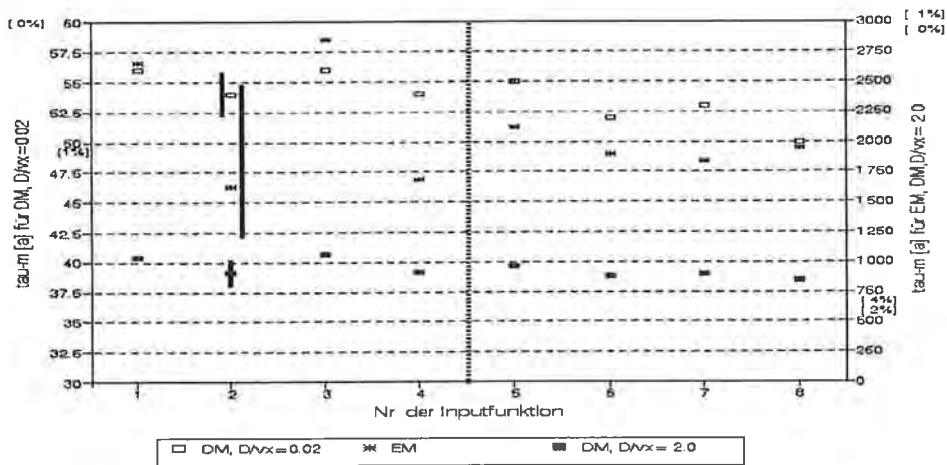


Fig. 4: Mittlere Verweilzeiten für einen Meßwert (1990) von $1,00 \pm 0,35$ T.U.; in eckigen Klammern jeweils der Jungwasseranteil α_{30} [%].
 Mean residence times for a measured value (1990) = $1,00 \pm 0,35$ T.U.; in square brackets the portion of young water α_{30} [%].

Bei einem Meßwert von $5,00 \pm 0,40$ T.U. (siehe Fig. 5) ergeben sich vergleichsweise größere Differenzierungen zwischen den einzelnen Modellen. Dies gilt insbesondere für das Exponentialmodell und das Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 2,0$. Die durch verschiedene Inputfunktionen bedingte Schwankungsbreite geht dabei über die meßfehlerbedingte Spanne weit hinaus; der Einfluß der Inputfunktion auf das Ergebnis der Datierung ist signifikant größer als bei einem Meßwert von $1,00 \pm 0,35$ T.U.

Für das Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 0,02$ liegen die erhaltenen Lösungen im Bereich von 42–50 a, wobei die meßfehlerbedingte Schwankungsbreite der Lösungen relativ klein ist, d. h., es handelt sich um vergleichsweise scharfe Lösungen. Dies dürfte vor allem an der peakförmig ausgebildeten Verweilzeitverteilungsfunktion liegen. Erwartungsgemäß wird bei kleineren mittleren Verweilzeiten die Schwankungsbreite des Jungwasseranteiles größer: 3–4 % für alle Modelle, bei Maximalwerten von 5 % bzw. 9 %.

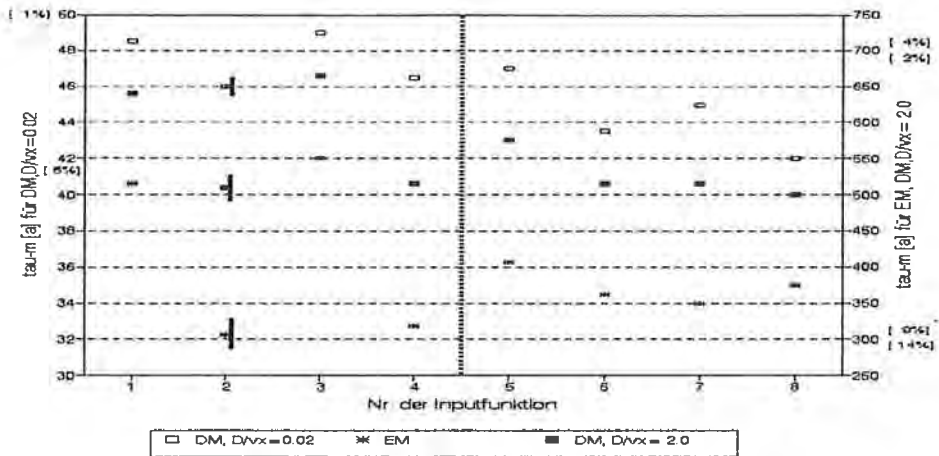


Fig. 5: Mittlere Verweilzeiten für einen Meßwert (1990) von $5,00 \pm 0,40$ T.U.; in eckigen Klammern jeweils der Jungwasseranteil α_{30} [%].
 Mean residence times for a measured value (1990) = $5,00 \pm 0,40$ T.U.; in square brackets the portion of young water α_{30} [%].

Wie Fig. 6 und 7 belegen, gelten diese Aussagen bei niedrigeren Absolutwerten der mittleren Verweilzeit für Meßwerte von $10,00 \pm 0,48$ T.U. bzw. $20,00 \pm 0,70$ T.U. sinngemäß. Eine Zusammenfassung der in Fig. 4 bis Fig. 7 dargestellten Ergebnisse gibt Tab. 3. Gemeinsam mit den bisher getroffenen Feststellungen ergeben sich daraus für die durchgeführten Untersuchungen zusammenfassend die folgenden Schlußfolgerungen.

2.4.1.3. Schlußfolgerungen

1. Die aus einer falsch gebildeten bzw. falsch verwendeten Inputfunktion resultierenden Fehler in der Bestimmung der mittleren Verweilzeit können beträchtlich größer sein als die aus dem Meßfehler resultierende Streubreite. Die Differenz zwischen maximaler und minimaler Verweilzeit kann fast so groß sein wie die minimale Verweilzeit selbst. Dies gilt vor allem für das Exponentialmodell und das Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 2,0$ bei großem Meßwert ($20,00 \pm 0,70$ T.U.). In diesen Fällen können die relativen Fehler sehr groß sein, während diese beim Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 0,02$ relativ gering sind.
2. Bei der Beurteilung der Absolutwerte von Schwankungsbreiten der mittleren Verweilzeit ist die hydrogeologische Relevanz der Unterschiede zu prüfen. So liegen z. B. die entsprechenden Differenzen im Jungwasseranteil α_{30} bei Meßwerten ≤ 10 T.U. in Bereichen, die für viele praktische Belange tolerierbar sein dürften.
3. Erwartungsgemäß ergeben sich für das Modell mit einer peakförmigen Verweilzeitverteilungsfunktion (DM mit $D/(vx) = 0,02$) relativ scharfe Lösungen, während für Modelle mit vorwiegend gleichförmig ausgebildeten Verweilzeitverteilungsfunktionen (EM und DM mit $D/(vx) = 2,0$) sowohl relativ unscharfe Lösungen als auch größere Differenzen zwischen den einzelnen Lösungen resultieren.
4. Alle für das Exponentialmodell gefundenen Lösungen der indirekten Aufgabe liegen zwischen den mittleren Verweilzeiten, die aus den mit Methode II ($\alpha = 1$ bzw. $\alpha = 0$) gebildeten Inputfunktionen resultieren. Für die anderen Modelle ergibt sich aus der Verwendung einer Inputfunktion mit $\alpha = 1$ ebenfalls eine maximale

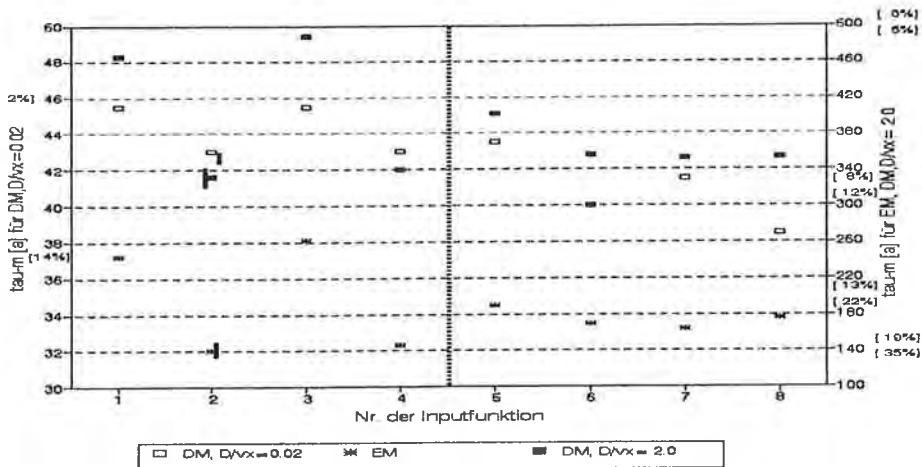


Fig. 6: Mittlere Verweilzeiten für einen Meßwert (1990) von $10,00 \pm 0,48$ T.U.; in eckigen Klammern jeweils der Jungwasseranteil α_{30} [%].
 Mean residence times for a measured value (1990) = $10,00 \pm 0,48$ T.U.; in square brackets the portion of young water α_{30} [%].

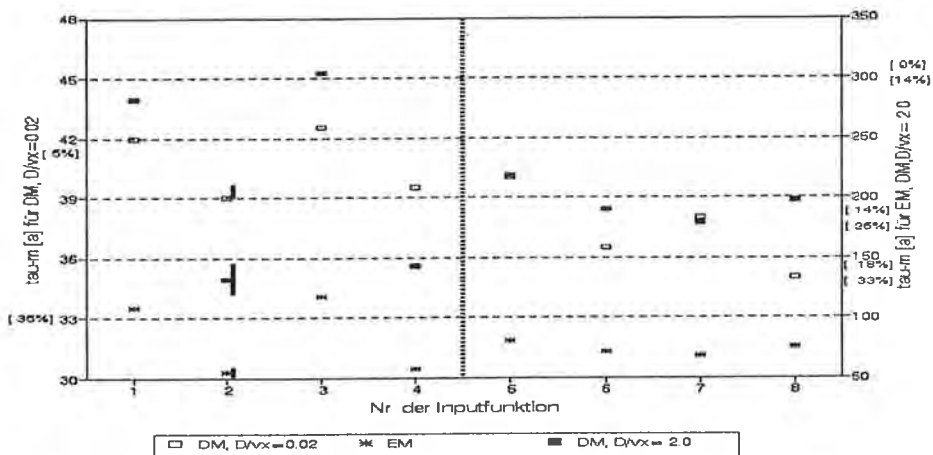


Fig. 7: Mittlere Verweilzeiten für einen Meßwert von $20,00 \pm 0,70$ T.U.; in eckigen Klammern jeweils der Jungwasseranteil α_{30} [%].
 Mean residence times for a measured value (1990) = $20,00 \pm 0,70$ T.U.; in square brackets the portion of young water α_{30} [%].

mittlere Verweilzeit. Jedoch werden die Minima z. T. durch Inputfunktionen markiert, die für relativ schwerdurchlässige bzw. mächtige Aerationen berechnet wurden.

Fehlen die für eine Anwendung des Modells BOWAM erforderlichen meteorologischen Daten, wäre im Falle geringmächtiger Aerationen eine Anwendung des Alpha-Konzeptes mit jeweils $\alpha = 0$ und $\alpha = 1$ möglich, um Minimal- und Maximalwerte der Lösung der indirekten Aufgabe zu erhalten. Mit mächtiger werdender Aerationenzone erhöht sich der Einfluß der Inputfunktion auf das

Tab. 3: Extremwerte der aus den Inputfunktionen 1-8 resultierenden Lösungen. Modell E.M.: Exponentialmodell; DM; DM (C_{PF}-Fall) mit D/(vx) = 0,02; DM_s; DM (C_{PF}-Fall) mit D/(vx) = 2,0. min. $\bar{\tau}_m$ = minimale mittlere Verweilzeit [a]; IF_{min} = Nr. der zugehörigen Inputfunktion; max. $\bar{\tau}_m$ = maximale mittlere Verweilzeit [a]; IF_{max} = der zugehörigen Inputfunktion; $\Delta\bar{\tau}_m$ = Differenz aus maximaler und minimaler Verweilzeit; $\bar{\tau}_m$ ' = Mittelwert aus maximaler und minimaler Verweilzeit [a]; $\Delta\bar{\tau}_m/\bar{\tau}_m$ ' = relative Abweichung zwischen maximaler und minimaler Verweilzeit; min. α_{50} = minimaler Jungwasseranteil [%]; max. α_{50} = maximaler Jungwasseranteil [%]; $\Delta\alpha_{50}$ = Differenz aus maximalem und minimalem Jungwasseranteil [%] bei einer Jungwasseraltersgrenze von 30 a.
 Extreme values of the solutions resulting from the input functions 1-8. Model E.M.: exponential model; DM; DM (C_{PF} case) with D/(vx) = 0,02; DM_s; DM (C_{PF} case) with D/(vx) = 2,0. min. $\bar{\tau}_m$ = minimal mean residence time [a]; IF_{min} = number of the corresponding input function; max. $\bar{\tau}_m$ = maximum mean residence time [a]; IF_{max} = number of the corresponding input function; $\Delta\bar{\tau}_m$ = difference from maximum and minimum mean residence time; $\bar{\tau}_m$ ' = average value from maximum and minimum mean residence time [a]; $\Delta\bar{\tau}_m/\bar{\tau}_m$ ' = relative deviation between maximum and minimum residence time; min. α_{50} = minimum fraction of young water [%]; max. α_{50} = maximum fraction of young water [%]; $\Delta\alpha_{50}$ = difference from maximum and minimum fraction of young water [%] for a young water age limit of 30 a.

Modell	Meßwert															
	1 ± 0,35 T.U.				5,00 ± 0,40 T.U.				10,00 ± 0,48 T.U.				20,00 ± 0,70 T.U.			
	EM	DM1	DM2	DM	EM	DM	DM2	DM	EM	DM1	DM2	DM	EM	DM1	DM2	DM
min. $\bar{\tau}_m$	1625	50	845	42	306	42	500	42	140	38,5	332	42	55	35	132	42
IF _{min}	2	8	8	8	2	8	8	8	2	8	2	8	2	8	2	8
max. α_{50}	2	1	1	5	9	5	5	5	19	12	12	5	42	25	37	37
max. $\bar{\tau}_m$	2850	56	1065	49	550	49	665	49	262	45,5	488	49	118	42,5	304	49
IF _{max}	3	1,3	3	3	3	3	3	3	3	1,3	3	3	3	3	3	3
min. α_{50}	1	0	0	1	5	1	2	1	11	2	6	2	22	5	14	14
$\Delta\bar{\tau}_m$	1225	6	220	7	244	7	165	7	122	7	156	7	63	8	172	7
$\Delta\bar{\tau}_m/\bar{\tau}_m$	0,55	0,11	0,23	0,15	0,57	0,15	0,28	0,15	0,61	0,17	0,38	0,15	0,73	0,19	0,79	0,19
$\Delta\alpha_{50}$	1	1	1	4	4	4	3	4	8	10	6	4	20	20	23	23

Datierungsergebnis. Dies gilt bei gleicher Mächtigkeit für schwerer durchlässige Materialien (Lehm) in stärkerem Maße als für leichter durchlässige Aerationen (Sand). (Siehe Fig. 3.)

5. Mit größer werdendem Meßwert reagiert das Ergebnis der Grundwasserdatierung zunehmend sensibler, d. h., die relativen Abweichungen der erhaltenen Lösungen voneinander nach Tab. 3 und somit der mögliche Fehler bei Verwendung einer falschen Inputfunktion werden größer.
6. Die Untersuchungen belegen die Bedeutung einer sorgfältigen Modellwahl; die Wahl eines falschen Modells kann zu Datierungsergebnissen führen, die um Größenordnungen von den natürlichen Verhältnissen abweichen.

Die extrem erhöhte Sensitivität der Tritiuminputfunktion und damit des Ergebnisses der Grundwasserdatierung gegenüber den konkreten Merkmalen der Aerationenzone und den meteorologischen Verhältnissen eines ariden Gebietes wird in einem der folgenden Kapitel verdeutlicht werden (siehe Abschnitt 4.4.3.).

2.4.2. Die Meßwerte

Grundsätzlich ist jeder Isotopenmeßwert mit einem Meßfehler behaftet. Die wahre Isotopenkonzentration liegt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit innerhalb des durch den Meßfehler überstrichenen Konzentrationsintervalls. Diese Tatsache bedingt zwangsläufig ein Ergebnis-Intervall und sollte deshalb bei der quantitativen Auswertung der Isotopenmessungen mehr Beachtung finden.

2.4.2.1. Methodik

Vernachlässigt man andere Fehlerursachen bei der Auswertung von Umweltisotopendaten, so ist der Fehler der mittleren Verweilzeit nur vom Meßfehler abhängig. Dem Meßwert wird ein Intervall mit einem Minimal- und einem Maximalwert zugeordnet. Für nachfolgende Untersuchungen wurde zunächst durch Lösen der direkten Aufgabe berechnet, wie hoch bei Verwendung verschiedener Modelle für bestimmte Werte der mittleren Verweilzeit die Outputkonzentration des Tracers ist.

Diese Werte der mittleren Verweilzeit werden nachfolgend als „wahre Werte“ der mittleren Verweilzeit bzw. der Outputkonzentration bezeichnet.

Der wahre Wert der Outputkonzentration kann in Extremfällen genau am Rand des vom Meßfehler überstrichenen Intervalls liegen (siehe Fig. 8: A', A", B', B").

Grundsätzlich wurde der Meßfehler auf zweierlei Weise berücksichtigt:

1. Auswertung von Extremwerten

Um die Spannbreite der Lösung der indirekten Aufgabe anzugeben, sind diese **diskreten** Extrema der Meßwerte auszuwerten, d. h.

- im Falle eines Meßwertes: die Werte $(B' - \Delta B')$ und $(B'' + \Delta B'')$, wobei $\Delta B'$ und $\Delta B''$ die Meßfehler sind,
- im Falle zweier Meßwerte: die durch die Linien **a', a'', b' und b''** vorgezeichneten Kombinationen diskreter Werte.

Als Lösungen erscheinen für die genannten zwei bzw. vier Auswertemöglichkeiten jeweils Werte, die als mögliches Minimum bzw. Maximum der Gesamtlösung interpretiert werden können.

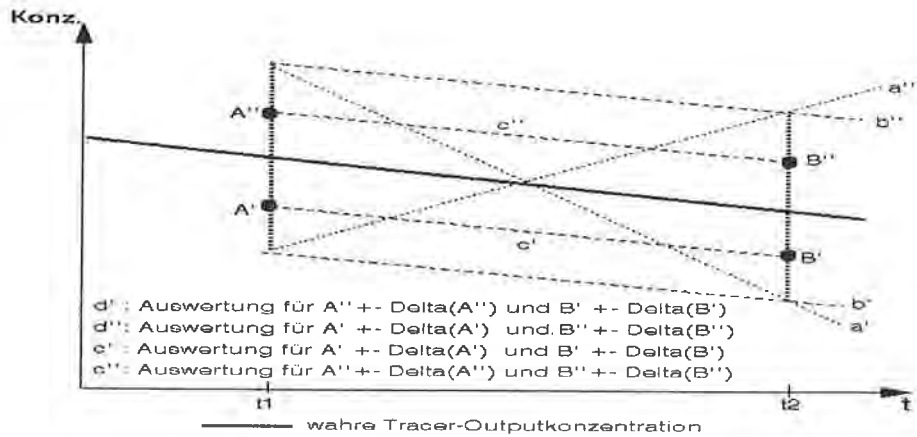


Fig. 8: Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Meßfehlers bei der Auswertung von ein bzw. zwei Tracermesswerten.
 Possibilities for the consideration of the measurement error in the interpretation of one or two tracer measurements.

2. Auswertung von Lösungsbereichen

Nach der Auswertung einer Vielzahl von Meßwerten wurde auf empirischer Basis die Hypothese formuliert, daß das Lösungsintervall der mittleren Verweilzeit durch die diskreten Werte der mittleren Verweilzeit markiert wird, für die die Modellabweichung kleiner als der maximale Meßfehler ist.

Die Modellabweichung wird hier ermittelt als Wurzel aus [der Summe der Fehlerquadrate zwischen Meßwert und Modelloutput zu einzelnen Zeitpunkten geteilt durch die Anzahl der Meßwerte].

Aus diesem Grunde wurden in die Untersuchungen die Lösungen des inversen Problems für die Varianten c' und c'' bzw. d' und d'' , die jeweils einen meßfehlerbedingten Lösungsbereich liefern, einbezogen. Das heißt, es wurden die diskreten Werte B', B'', A', A'' ausgewertet, und das Lösungsintervall wurde durch diejenigen mittleren Verweilzeiten markiert, für die die Modellabweichung kleiner als der maximale Meßfehler ist. Die Lösungsintervalle wurden aus Gütefunktionen abgelesen, die mit einer modifizierten Version des Programmes MULTIS berechnet wurden.

Zunächst wurde unter Nutzung der Inputfunktion Nr. 7 (vgl. Abschnitt 2.4.1.) für das Exponentialmodell und das Dispersionsmodell (C_{II} -Fall nach P. MALOSZEWSKI & A. ZUBER, 1982) mit $D/vx = 0,02$ bzw. $D/vx = 2,0$ die direkte Aufgabe für verschiedene Verweilzeiten bzw. mittlere Verweilzeiten gelöst: 5 a, 20 a, 50 a, 200 a, 500 a, 2000 a. Die erhaltenen Werte dienten für die weiteren Überlegungen als Kurve der „wahren“ Traceroutputkonzentration nach Fig. 8. Der Zeitpunkt t_2 wurde mit dem Jahre 1990 festgelegt, für den Meßzeitpunkt t_1 wurden jeweils die Jahre 1980, 1985 und 1989 betrachtet. Durch diese Verfahrensweise sollten auch Aussagen über die allgemein postulierte Zunahme der Aussagesicherheit mit der Verlängerung des durch Probenahmen überstrichenen Zeitintervalles gewonnen werden.

Die Berechnung des meßwertabhängigen Meßfehlers für jeweils A', A'', B' und B'' wurde nach U. MORGENSTERN et al. (1992) bzw. nach U. MORGENSTERN (1992) für die Messung mit einem Flüssigkeitsszintillationsmeßgerät „Quantulus 1220“ bei 20facher elektrolytischer Anreicherung vorgenommen (Fig. 9). Die horizontale und die vertikale Linie markieren die untere Nachweisgrenze von etwa 0,7 T.U.,

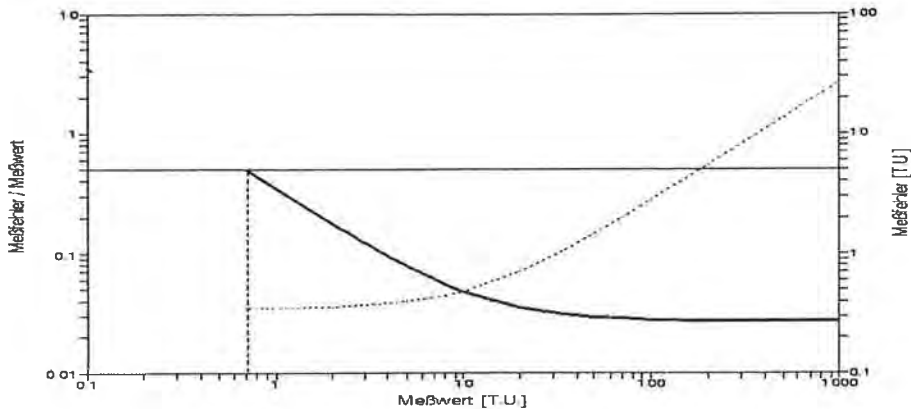


Fig. 9: Meßfehler (gepunktet, ansteigend) und relativer Meßfehler (durchgezogen, abfallend) in Abhängigkeit von der Größe des Meßwertes.
Measurement error (dotted line, ascending) and relative measurement error (solid line, descending) versus measured value.

an der der relative Meßfehler im 95 % Vertrauensbereich bei 0,5 liegt. Für Werte unterhalb dieser Nachweisgrenze wurde der Meßfehler nach U. MORGENSTERN (1992) für Zählung im Proportionalzählrohr bei 45facher Anreicherung ermittelt. Für den Meßwertbereich von 0,26–0,70 T.U. ergeben sich damit Meßfehler von 0,08 T.U., für kleinere Meßwerte Fehler von 0,07 T.U.

Es wird davon ausgegangen, daß die damit verbundenen Nachweisgrenzen zur Zeit dem Stand der für hydrogeologische Belange relevanten Meßtechnik entsprechen.

2.4.2.2. Ergebnisse

Im folgenden werden die Ergebnisse für die genannten drei Modellvarianten sowie für einen Einzelmeßwert (1990) bzw. zwei Meßwerte jeweils gemeinsam in Abbildungen dargestellt, denen dieselbe „wahre“ mittlere Verweilzeit zugrunde liegt.

In den nachfolgenden Fig. 10 bis 15 sind die erhaltenen Lösungsbereiche für ein, zwei oder drei Berechnungsmodelle in Form von Balkentripeln dargestellt. Diese Tripel haben in den vier Kästchen jeder Grafik folgende Bedeutung:

- Das erste Tripel kennzeichnet den Bereich zwischen minimaler und maximaler Verweilzeit bei Auswertung für a' , a'' , b' , b'' nach Fig. 8. Im allgemeinen resultieren diese Extrema aus den Lösungsbereichen für b' bzw. b'' .
- Das zweite Tripel kennzeichnet den minimalen Lösungsbereich bei Auswertung für c' , c'' , d' , d'' nach Fig. 8. Im allgemeinen resultieren diese Extrema aus den Lösungsbereichen für c' bzw. c'' .
- Das dritte Tripel kennzeichnet analog zum zweiten Tripel den maximalen Lösungsbereich.

In den Tripeln sind jeweils nacheinander Lösungen für die genannten drei Modellvarianten angeordnet. Sind mehrere Lösungen im untersuchten Zeitintervall vorhanden oder markiert eine Lösung für c' , c'' , d' oder d'' gleichzeitig den minimalen und maximalen Lösungsbereich, so wurde dies durch eine über den Balken stehende Ziffer „2“ gekennzeichnet.

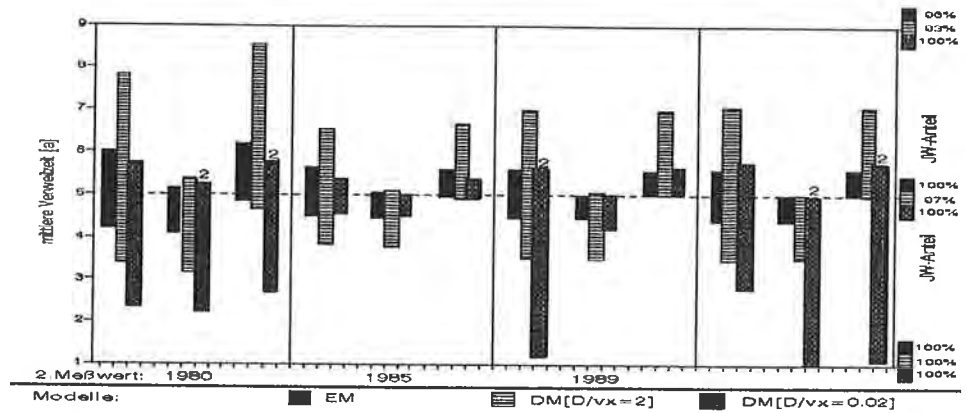


Fig. 10: Datierungsergebnisse für eine primäre mittlere Verweilzeit von 5 a.
Age dating results for a primary mean residence time of 5 a.

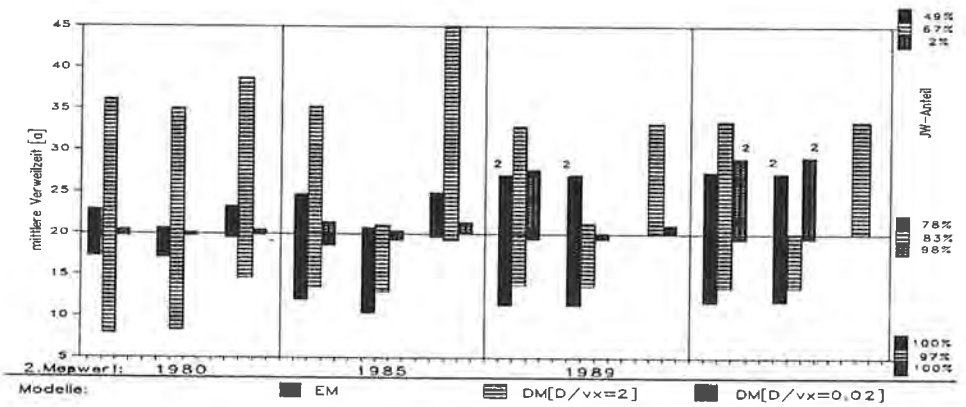


Fig. 11: Datierungsergebnisse für eine primäre mittlere Verweilzeit von 20 a.
Age dating results for a primary mean residence time of 20 a.

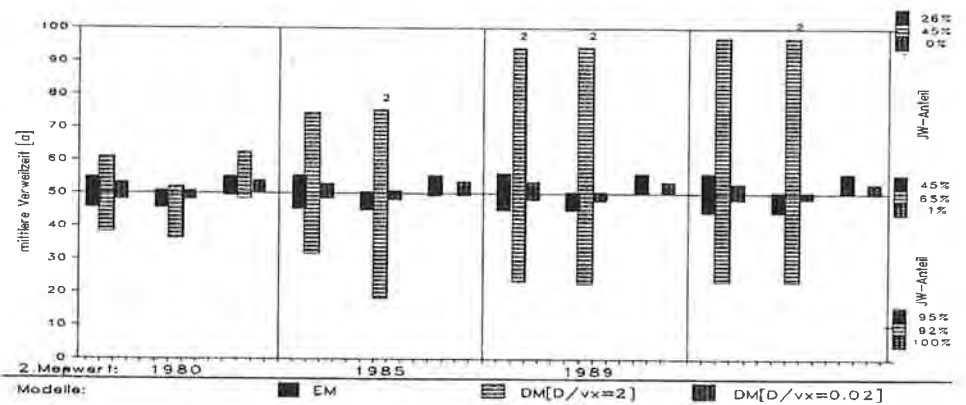


Fig. 12: Datierungsergebnisse für eine primäre mittlere Verweilzeit von 50 a.
Age dating results for a primary mean residence time of 50 a.

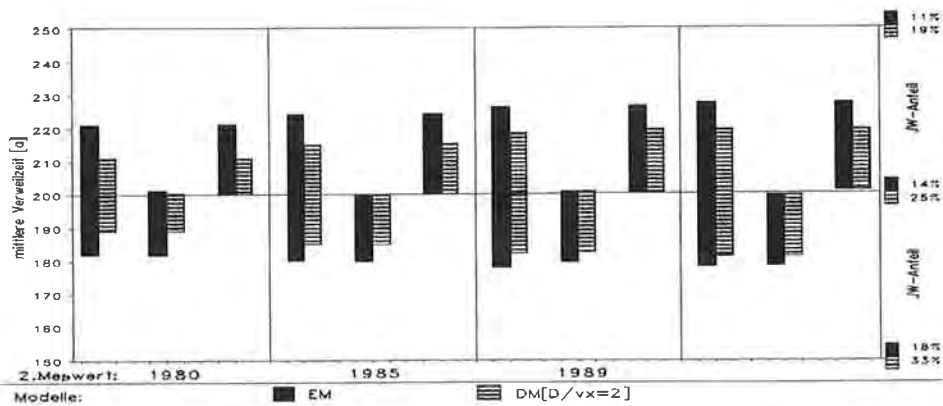


Fig. 13: Datierungsergebnisse für eine primäre mittlere Verweilzeit von 200 a.
Age dating results for a primary mean residence time of 200 a.

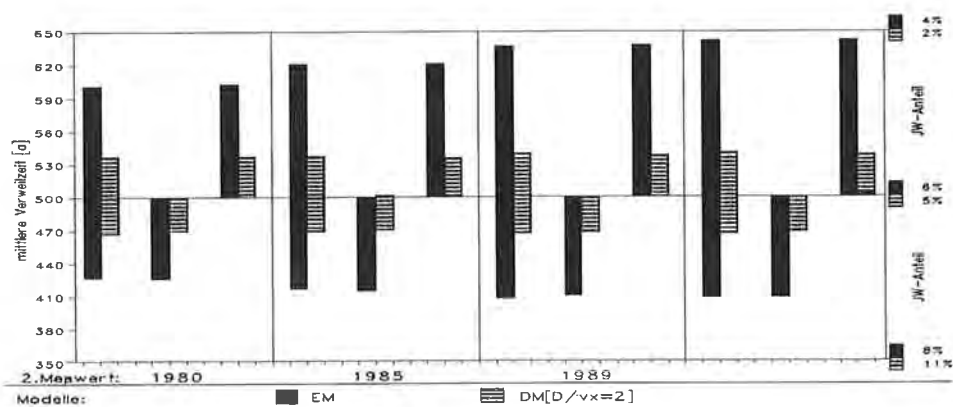


Fig. 14: Datierungsergebnisse für eine primäre mittlere Verweilzeit von 500 a.
Age dating results for a primary mean residence time of 500 a.

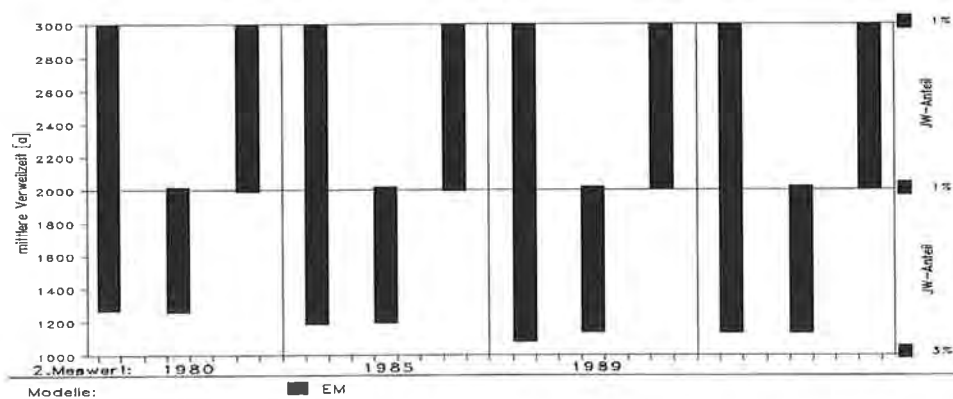


Fig. 15: Datierungsergebnisse für eine primäre mittlere Verweilzeit von 2000 a.
Age dating results for a primary mean residence time of 2000 a.

Auf der rechten Achse der Grafiken ist in eckigen Klammern der zur entsprechenden Verweilzeit gehörende Jungwasseranteil α_{30} für die einzelnen Modelle angegeben.

Es wurden jeweils vier Möglichkeiten der Meßzeitpunkte untersucht: 1980 und 1990, 1985 und 1990, 1989 und 1990 sowie ein Einzelmeßwert im Jahre 1990. Diese Reihenfolge wurde auch für die Darstellung in den vier Teilkästchen jeder Grafik (von links nach rechts) gewählt.

2.4.2.2.1. Das Exponentialmodell

Die in Fig. 10 dargestellten Ergebnisse zeigen, daß für eine Verweilzeit von 5 a die mögliche Abweichung der Lösung vom wahren Wert (vgl. Abschnitt 2.4.2.1.) bei allen untersuchten Längen des Beprobungszeitraumes bei maximal einem Jahr (20 % des wahren Wertes) liegt. Diese relative Abweichung erhöht sich bei einer wahren mittleren Verweilzeit von 20 a (Fig. 11). Grund dieser Erscheinung dürfte das Vorhandensein einer Doppellösung („jung“ und „alt“) sein, die durch die peakförmige Gestalt der Inputfunktion bedingt wird. Jedoch tritt hier mit Verlängerung des Beprobungsintervalls eine spürbare Einengung des Lösungsbereiches auf.

Bei größeren Verweilzeiten von 50 a, 200 a, 500 a und 2000 a (Fig. 12 bis Fig. 15) ist dieser Effekt nur in abgeschwächter Form zu beobachten, d. h., bei länger werdendem Beprobungsintervall verkleinert sich die Länge des Lösungsbereiches nur unwesentlich. Bis zu einer Verweilzeit von 500 a steht die Länge des Lösungsintervalls noch in einer mehr oder weniger vertretbaren Relation zum wahren Wert der mittleren Verweilzeit. Bei einer mittleren Verweilzeit von 2000 a läßt sich lediglich noch ein Mindestwert für die mittlere Verweilzeit ableiten.

Für alle untersuchten Fälle gilt:

- Die Lösungsbereiche nach den Methoden c', c'', d' und d'' (siehe Fig. 8) erfassen den wahren Wert der mittleren Verweilzeit.
- Die mit den einzelnen Lösungsbereichen verbundene Schwankungsbreite des Jungwasseranteiles α_{30} führt nicht zu grundlegenden Veränderungen ableitbarer praktischer Aussagen (z. B. bei Gefährdungsabschätzungen).

2.4.2.2.2. Das Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 2,0$

Bei der Betrachtung der Lösungen für dieses Modell fällt auf, daß für Verweilzeiten bis zu 20 a die Verlängerung des Beprobungsabstandes von 0 auf 1 a, 5 a bzw. 10 a keine wesentliche Verbesserung der Aussagegenauigkeit mit sich bringt, sondern sogar zu einem vergrößerten Lösungsbereich führt. Der Grund dafür liegt in einer Vermischung mit einer anderen diskreten Lösung. Eine weitere Ursache besteht darin, daß die Outputkonzentrationen in der Vergangenheit z. T. deutlich über den gegenwärtigen liegen und somit auch entsprechend höhere Meßfehler nach sich ziehen.

Es ist anzumerken, daß im Vergleich zum Exponentialmodell bis zu einer mittleren Verweilzeit von 50 a das Exponentialmodell die schärferen Lösungen liefert, während bei größeren mittleren Verweilzeiten sich dieses Verhältnis umkehrt.

Hinsichtlich des Jungwasseranteils α_{30} und der Lösungsbereiche nach den Methoden c', c'', d' und d'' ergeben sich die gleichen Aussagen wie für das Exponentialmodell.

2.4.2.2.3. Das Dispersionsmodell mit $D/(vx) = 0,02$

Die Besonderheit dieses Modells gegenüber den vorangehend besprochenen besteht in seiner ausgesprochen peakförmig ausgebildeten Verweilzeitverteilungs-

funktion. Daher sind relativ scharfe Lösungen zu erwarten. Während für Verweilzeiten von 20 a und 50 a dieses Modell deutlich kürzere Lösungsintervalle aufweist, ergeben sich jedoch für eine wahre mittlere Verweilzeit von 5 a (Fig. 10) Streubreiten der Lösungen, die sogar größer sind als bei den anderen beiden Modellen. Ursache hierfür sind Doppellösungen: Diese sind z. T. dadurch bedingt, daß wegen der relativ steilen Kurve der Verweilzeitverteilungsfunktion – und damit wegen des steilen Anstieges und Abfalles der Kurve des berechneten Modelloutputs – die angepaßten Modellparameter besonders sensibel auf Schwankungen der Bezugsgröße Meßwert (verbunden mit dem Meßfehler) reagieren.

Zusammenfassend läßt sich für diese Modellvariante feststellen:

- a) Abgesehen von Doppellösungen ist dieses Modell bei mittleren Verweilzeiten ≥ 20 a mit relativ geringen Unsicherheiten im Parameter mittlere Verweilzeit anzupassen.
- b) Für mittlere Verweilzeiten ≤ 5 a erscheint insbesondere bei Verwendung von Einzelmeßwerten lediglich die Angabe einer **maximalen** mittleren Verweilzeit als Lösung sinnvoll.
- c) Das Problem bei der Kalibrierung dieses Modells dürfte in der Anpassung des Parameters $D/(vx)$ liegen, wofür zusätzliche hydrogeologische Informationen erforderlich sind.
- d) Die durch Auswertung nach Methode c' und c'' gewonnenen Lösungsbereiche überstreichen grundsätzlich den Wert der wahren Lösung.

2.4.2.3. Schlußfolgerungen

1. Bei der quantitativen Auswertung von Tritiummeßwerten zur Grundwasserdatierung ist die Größe der Meßfehler zu beachten.
2. Die möglichen Abweichungen der erhaltenen diskreten Lösungen vom wahren Wert der mittleren Verweilzeit bei alleiniger Betrachtung diskreter Meßwerte sind abhängig vom verwendeten Modell und der Länge des Beobachtungszeitraumes.
3. Die aus Meßfehlern resultierenden Größen von Lösungsintervallen der mittleren Verweilzeit bzw. des Jungwasseranteiles bleiben so begrenzt, daß dadurch die quantitative Auswertung von Tritiummeßdaten nicht in Frage gestellt wird.
4. Grundsätzlich verbessert sich die Aussagegenauigkeit bei Verlängerung dieses Beobachtungszeitraumes. Dieser Effekt konnte insbesondere bei Intervalllängen ab fünf Jahre festgestellt werden.
5. Jedoch ist es möglich, daß bei Verlängerung des Zeitintervalls, bedingt durch sehr unterschiedliche Größen der beiden jeweiligen Meßfehler, eine zweite diskrete Lösung möglich wird und diese somit den Lösungsbereich vergrößert. Das heißt, für den Bearbeiter wird ein Effekt sichtbar, der der grundsätzlichen Verbesserung der Aussagegenauigkeit bei verlängertem Beobachtungszeitraum widerspricht (vgl. 3.).
6. Die Größe der entstehenden Lösungsbereiche verbietet in den meisten Fällen die Angabe eines diskreten Wertes als Lösung. Dies gilt umso mehr, als daß bereits mit der Annahme des Berechnungsmodells Idealisierungen verbunden sind und der Meßfehler nur einen unter vielen Einflußfaktoren darstellt, die die Genauigkeit der erhaltenen Lösung beeinflussen.
7. Nicht zuletzt deshalb sollte die Angabe einer mittleren Verweilzeit immer den Hinweis auf das zugrundegelegte Modell einschließen.

8. Eine sinnvolle Alternative zur Angabe der mittleren Verweilzeit als Lösung der indirekten Aufgabe stellen abgeleitete Parameter dar, die von der jeweiligen praktischen Fragestellung abhängen (z. B. der Jungwasseranteil α nach R. GELLERMANN et al., 1990).
9. Die Bereiche der Lösung, die aus mittelbarer Übertragung des größten Meßfehlers auf den freien Parameter mittlere Verweilzeit resultieren (siehe eingangs formulierte Hypothese, Fig. 8: c', c'', d', d''), schließen fast immer den wahren Wert der mittleren Verweilzeit mit ein. Abweichungen davon sind vernachlässigbar.
10. Da der Bearbeitungsaufwand nach dem unter 9. beschriebenen Verfahren wesentlich kleiner ist als die separate Ermittlung der Minimal- und Maximallösungen nach a', a'', b' und b'', sollte einer Auswertung nach 9. der Vorzug gegeben werden.
11. Um a) diese Lösungsbereiche feststellen zu können und b) eventuell vorhandene Mehrfachlösungen identifizieren zu können, ist es erforderlich, im Auswerteprozess ein Feld der Gütefunktion aufzustellen, wie dies erstmals durch das Computerprogramm MULTIS (siehe Abschnitt 5.1., 5.2. sowie Tafel 1) realisiert wird.

Zur Realisierung der vorangehend beschriebenen Untersuchungen war eine spezielle Anpassung der Software erforderlich. Insbesondere mußten die originalen Abtastintervalle für niedrige Werte der mittleren Verweilzeit verkleinert werden, um sowohl alle Lösungen zu erfassen als auch eine erhöhte Genauigkeit zu erreichen. Daher sollte eine zukünftige Programmversion dahingehend erweitert werden.

3. Fallbeispiel für humide Gebiete

Als Untersuchungsbeispiel wurden die Mineralwasserquellen von Bad Brambach im Oberen Vogtland am Nordwestrand der Böhmisches Masse gewählt (Fig. 16). Die Mineralwässer des Ortes werden insbesondere wegen ihrer Gehalte an Radon und freiem Kohlendioxid bereits seit Anfang dieses Jahrhunderts balneologisch genutzt. Die Wahl des Untersuchungsgebietes wurde durch das Vorhandensein langjähriger Tritiummeßreihen begünstigt. Auswertungen dieser Meßreihen wurden bereits in früheren Publikationen vorgestellt. Jedoch ergeben sich durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Computerprogramm MULTIS verbesserte Bearbeitungsmöglichkeiten, die nachfolgend vorgestellt werden sollen.

3.1. Geographische und geologische Kurzbeschreibung des Untersuchungsgebietes

Zur Geologie der Region liegen eingehende Beschreibungen vor, zusammengefaßt u. a. von W. MICHLER (1973), A. WATZNAUER & U. KOCH (1989) und A. STUMM (1993). Letztgenannte dienen als Grundlage für die nachfolgende Kurzcharakteristik.

Das betrachtete Gebiet gehört zur Fichtelgebirgisch-Erzgebirgischen Antiklinalzone des Saxothuringikums. Es dominieren paläozoisch-präkambische kristalline Gesteine. In Bad Brambach grenzen oberkarbonisch bis permisch intrudierte Granite des Fichtelgebirges im S an die Gneise des Vogtländischen Schiefergebirges im N.

Der Verlauf dieser Grenze in der Talsenke des Kurgeländes entspricht etwa dem des in E-W-Richtung fließenden Röthenbaches (Fig. 17).



Fig. 16: Lage des Untersuchungsgebietes.
Location map of the investigation area.

Tektonisch wird das Untersuchungsgebiet vor allem von folgenden Haupt-richtungen geprägt:

- a) N-S-streichende Störungen, die in Verbindung mit einer etwa 50 km breiten Störungszone Wismar–Magdeburg–Naabtal/Rostock–Dessau–Regensburg zu sehen sind (H. KÄMPF et al., 1992). Diese Zone erfuhr Aktivierungen in Oberkarbon, Perm, Kreide, Tertiär und Quartär. Partuell wird eine Reichweite bis zum oberen Mantel angenommen (Karbonatit von Delitzsch).
- b) NE-SW- bis E-W-orientierte Elemente, die in Zusammenhang mit der Süderzgebirgischen Tiefenstörung (Ohre-Störungssystem, „Eger-Rift“) zu sehen sind. Als Indizien für deren Tiefenreichweite bis zum Oberen Mantel und ihre rezente Aktivität werden der Basaltaufstieg in Verbindung mit dem Eger-Rifting und der Kohlendioxidgehalt der Mineralwässer der Region angesehen. Neueste Untersuchungen von F. WEINLICH et al. (1993) belegen anhand von $\delta^{13}\text{C}$ - und $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Messungen eine starke Mantelbeeinflussung und die magmatische Herkunft des CO_2 . Die genannte Richtung kontrolliert offenbar auch den Verlauf des Röthenbaches auf dem Kurgelände (Fig. 17).
- c) Untergeordnet NW-SE-gerichtete Tiefenstörungen, die mit der Marienbader Störungszone in Verbindung zu bringen sind.

Weiterhin wurden im Untersuchungsgebiet Anzeichen einer hydrothermal bedingten Kaolinisierung festgestellt, die an NNW-SSE-streichende Quarzgänge gebunden ist.

Die Bodenzone ist im Untersuchungsgebiet in den Hangbereichen (auf Gneis- bzw. Granituntergrund) relativ geringmächtig ausgebildet und nimmt talwärts an

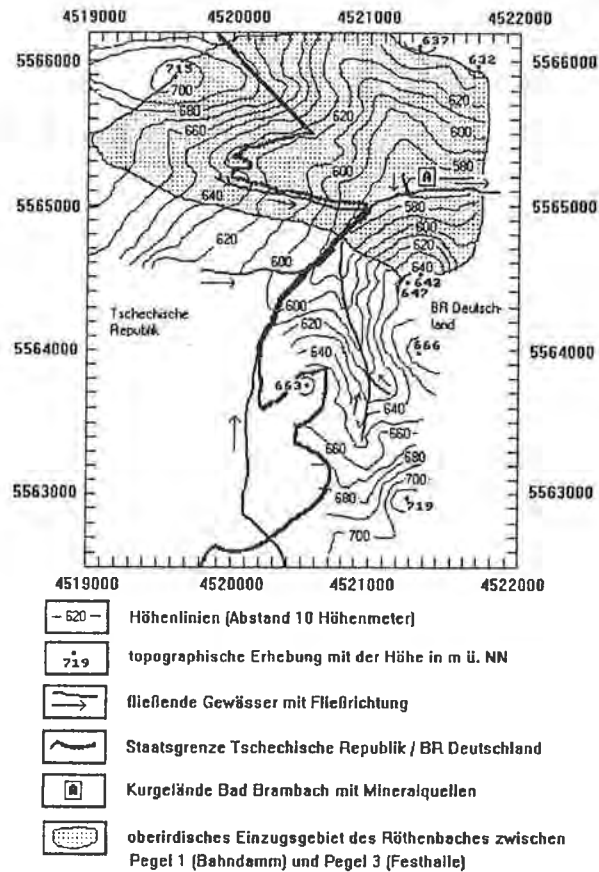


Fig. 17: Ausdehnung des oberirdischen Einzugsgebietes, (Hoch- und Rechtswerte in m).
Extent of the surface catchment area (northing and easting in m).

Mächtigkeit zu. In den zentralen Talbereichen erreichen die Lockermaterialien Gesamtmächtigkeiten von bis zu 8 m, im wesentlichen aus grob- und feinkörnigen Festgesteinsbruchstücken, einer Sand- bzw. Kiesschicht und Hanglehm bestehend. Der feinsandige bis tonig-schluffige Hanglehm kommt insbesondere an morphologisch tiefegelegenen Bereichen vor und kann mehrere Meter Mächtigkeit erreichen. Das im folgenden Abschnitt näher umgrenzte Einzugsgebiet (Fig. 17) ist etwa zu einem Viertel mit Wald bedeckt, vom verbleibenden Areal werden etwa 15 % als Acker genutzt, 10 % sind bebaut, der Rest ist ungenutzte Wiese.

3.2. Hydrogeologie und Hydrologie des Untersuchungsgebietes

Entsprechend der geologischen Situation sind im Untersuchungsgebiet folgende grundwasserführende Einheiten zu unterscheiden:

- a) Lockergesteine des Talbereiches, die erhebliche Schwankungen in Mächtigkeit und Zusammensetzung aufweisen. Zusammenfassend werden im Sinne dieser Arbeit dazu auch die grusigen Verwitterungsmassen des Granites gezählt.

Verbreitet werden dabei Sande, Kiese und Gesteinsbruchstücke von Auelehmen und tonig-schluffigen Sedimenten mit humosen Einlagerungen überlagert. Nach U. KOCH (1993) ist in der Umgebung der flachgefaßten Mineralwasserquellen des Kurgeländes mit einer etwa 30 cm mächtigen schluffig-tonigen Schicht zu rechnen, die in der Umgebung der Quellen in einem Umkreis von mehreren Dekametern ausgebildet ist.

- b) Der tiefere Untergrund wird geprägt von den Kluftgrundwasserleitern der Granit- bzw. Gneiskörper mit den vorangehend beschriebenen bevorzugten Hauptkluft-richtungen. Nach den in H. JORDAN et al. (1991) zusammengestellten Werten beträgt die Transmissivität im Granit $n \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Damit ist dieser Grundwasserleiter als mäßig ergiebiger bzw. durchlässiger Aquifer zu bezeichnen.

Die Richtungen der Fließgewässer werden hauptsächlich von den unter Abschnitt 3.1. beschriebenen N-S- und E-W-Richtungen, (siehe a) bzw. b), kontrolliert.

Die Lage der Mineralwasserquellen ist Fig. 18 zu entnehmen. Dabei sind im wesentlichen zwei Gruppen zu unterscheiden:

- Die frei auslaufenden Radon-, Eisen-, Wiesen- und Schillerquelle sind in einer Tiefe von etwa 5-6 m gefaßt und sitzen mehr oder weniger direkt auf der Festgesteinsoberfläche des Granits. Diese Quellen befinden sich im zentralen Bereich des Röthenbachtals, der auch als „Kurgelände“ bezeichnet wird. Wegen ihrer äußerst schlechten und undefinierten Fassungsbedingungen wird die Schillerquelle aus den weiteren Untersuchungen ausgeklammert.
- Die Mineralwässer der „Unteren bzw. Oberen Grenzquelle“ werden aus Bohrburgen mit Teufen von 110 m bzw. 98 m gefördert. Die Untere Grenzquelle ist bis 41 m Teufe verrohrt, unterhalb davon unverrohrt; die Obere Grenzquelle ist von 60–98 m Teufe verfiltert und in den restlichen Bereichen verrohrt.

Die Wiesenquelle wird von verschiedenen Autoren ausschließlich dem Lockergesteinsgrundwasserleiter der Talaue zugeordnet. Wegen der unmittelbaren Nähe zur Radonquelle ist dies aus Sicht des Autors nicht haltbar.

Der Grundwasserflurabstand schwankt im Bereich der flachen Mineralwasserquellen zwischen 1,40 und 1,50 m, wobei Extrema im Winter mit 1,30 m bzw. im Sommer mit 1,70 m erreicht werden (U. KOCH, 1993). In den Hangbereichen ist der Flurabstand zwar größer, diese haben aber wegen ihrer Entfernung zum engeren Kurgelände einen relativ geringen Einfluß auf den Tritiumgehalt der in den Quellen austretenden Jungwasserkomponente.

Somit ist das in den Quellen austretende Wasser als Gemisch von zwei Grundwasserkomponenten anzusehen:

- Eine relativ junge Komponente, die an die oberflächennahen Lockersedimente gebunden ist und wahrscheinlich stark von Niederschlagsereignissen beeinflusst wird.
- Eine relativ alte Komponente, die an den mäßig durchlässigen Festgesteinsgrundwasserleiter gebunden ist. Einen wichtigen Hinweis für das Vorhandensein dieser Komponente lieferten H. JORDAN et al. (1979), die auf der Grundlage von Edelgasmessungen an Wässern der Radonquelle und der Oberen Grenzquelle auf pleistozäne Wasseralter schlossen.

H. JORDAN et al. (1991) postulierten die These einer natürlichen Druckentlastungszone für Grundwässer im Bereich des Röthenbachtals. Zweifellos sind aufgrund der tektonischen Position des Gebietes und der postvulkanischen CO_2 -

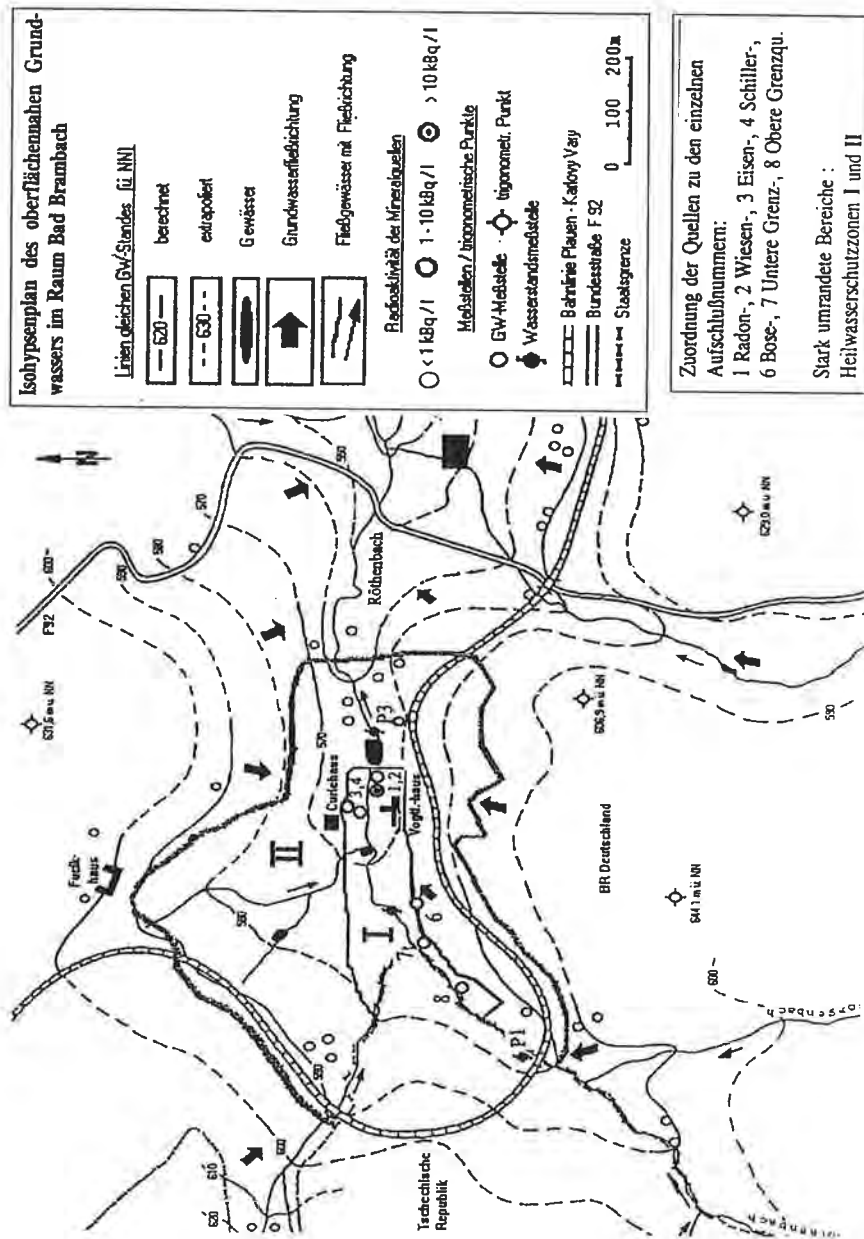


Fig. 18: Lage von Mineralwasserquellen in Bad Brambach im Isobypsenplan; leicht verändert nach U. KOCH & W. MITCHLER (1991).
 Situation of mineral water springs in Bad Brambach in the ground water contour map slightly modified, after U. KOCH & W. MITCHLER (1991).

Austritte eine beträchtliche Tiefenreichweite und laterale Wegsamkeiten innerhalb des Festgesteines anzunehmen. Dahingegen ist die Radonführung der Wässer nach Ansicht des Autors wohl eher lokalen Ursachen, wie z. B. einem Kluftbesatz mit radioaktiven Mineralen (festgestellt u. a. in 20–40 m Tiefe bei einem Schurf der SDAG Wismut im Jahre 1950 – R. DAENECKE, 1993), zuzuordnen.

Für die Abschätzung der Grundwasserneubildung wurden Werte nach verschiedenen Verfahren herangezogen:

1. Nach BMI-BOWAM-2 beträgt für die Nutzungsart Wiese bei einem Grundwasserflurabstand von 1,5 m die Summe aus hypodermischem Abfluß und Grundwasserneubildung 228 ± 138 mm/a.
Dabei wurden Anteile des oberirdischen Abflusses bezogen auf den Niederschlag nach F. WILHELM (1987) für 7 % Hangneigung (RO-Anteile 29 %, 14 %, 23 %, 19 %, Mittel: 23 %) eingesetzt. Betrachtet man den resultierenden Betrag des Oberflächenabflusses von etwa 173 mm/a, so scheint dieser im Widerspruch zu dem von A. STUMM (1993) ermittelten Wert von $(450 \pm \Delta_{RO})$ mm/a zu stehen. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Abschätzung des Anteiles des oberirdischen Abflusses am Niederschlag nach F. WILHELM (1987) zwar relativ ungenau ist. Jedoch erscheinen die so gewonnenen Daten trotzdem als wertvoll, denn sie beruhen – im Unterschied zu den von A. STUMM (1993) ermittelten Werten – nicht auf Abflußmessungen. Als mögliche Ursache für die gefundene Diskrepanz zwischen den stark unterschiedlichen Resultaten erscheint der Einfluß des diskutierten Fremdzufusses plausibel.
Für 3 % Hangneigung auf schluffig-lehmigen Böden (Winter 17 %, Frühling 9 %, Sommer 23 %, Herbst 12 %, Jahresmittel 16 %) ergeben sich für Wiese 268 mm/a.
2. U. KOCH (1988) ermittelte nach dem Verfahren von W. KRAFT & D. SCHRÄBER (1982) Werte von 129–219 mm/a.
3. W. MICHLER (1973) geht von einem Wert von etwa 63 mm/a aus und berechnet für das Einzugsgebiet der Weißen Elster im Oberen Vogtland einen sehr hohen durchschnittlichen RO-Anteil (bezogen auf den Niederschlag) von 39 % für das gesamte Jahr.

Eine Ermittlung nach dem MAILLET-Verfahren (vgl. auch D. SCHRÄBER & P. SZYMCZAK, 1984) war nicht möglich, da das erforderliche belastbare Datenmaterial für diese Arbeit nicht verfügbar war.

3.3. Auswertung von Tritiumdaten

Die in den Mineralwasserquellen gemessenen Tritiumkonzentrationen veranschaulicht Fig. 19.

Unter Berücksichtigung der vorangehend beschriebenen Gegebenheiten wurden mit dem Programmpaket BMI-BOWAM-2 (siehe Abschnitt 5.2.) für Grasbedeckung und eine lehmig-sandige Aerationzone mit einer Mächtigkeit von 1,5 m zwei Inputfunktionen berechnet, die ebenfalls in die Abbildung aufgenommen wurden: für 3 % Geländeneigung und für 7 %. Dabei wird sichtbar, daß die betrachteten unterschiedlichen Anteile des oberirdischen Abflusses keine gravierenden Auswirkungen auf die Inputfunktion haben. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, daß für die Wichtung der Tritiumkonzentrationen im Niederschlag (siehe Gl. 9) nicht in erster Linie die absolute Größe der Monats-Neubildungsbeiträge, sondern ihr Verhältnis zum Jahreswert der Grundwasserneubildung verantwortlich ist.

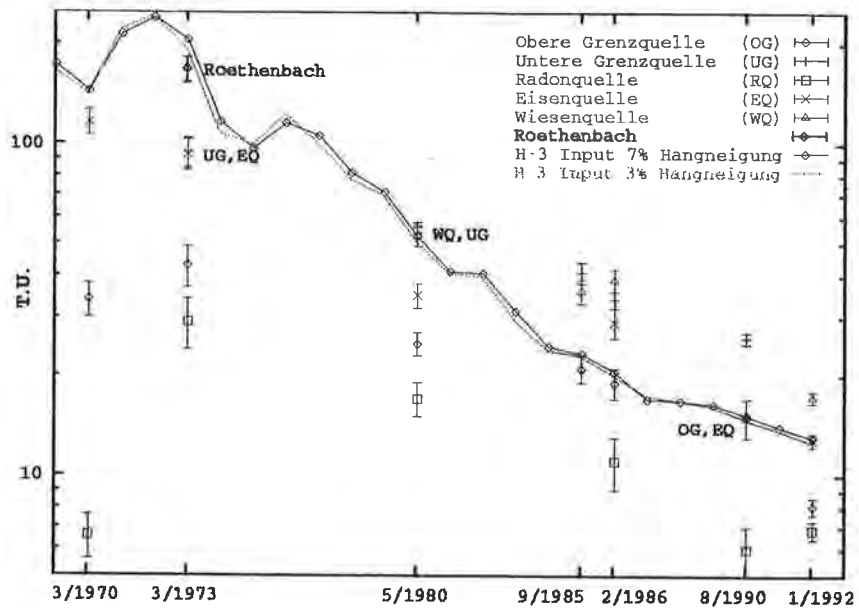


Fig. 19: Tritiumkonzentrationen in Mineralwässern von Bad Brambach.
Tritium concentrations in mineral waters of Bad Brambach.

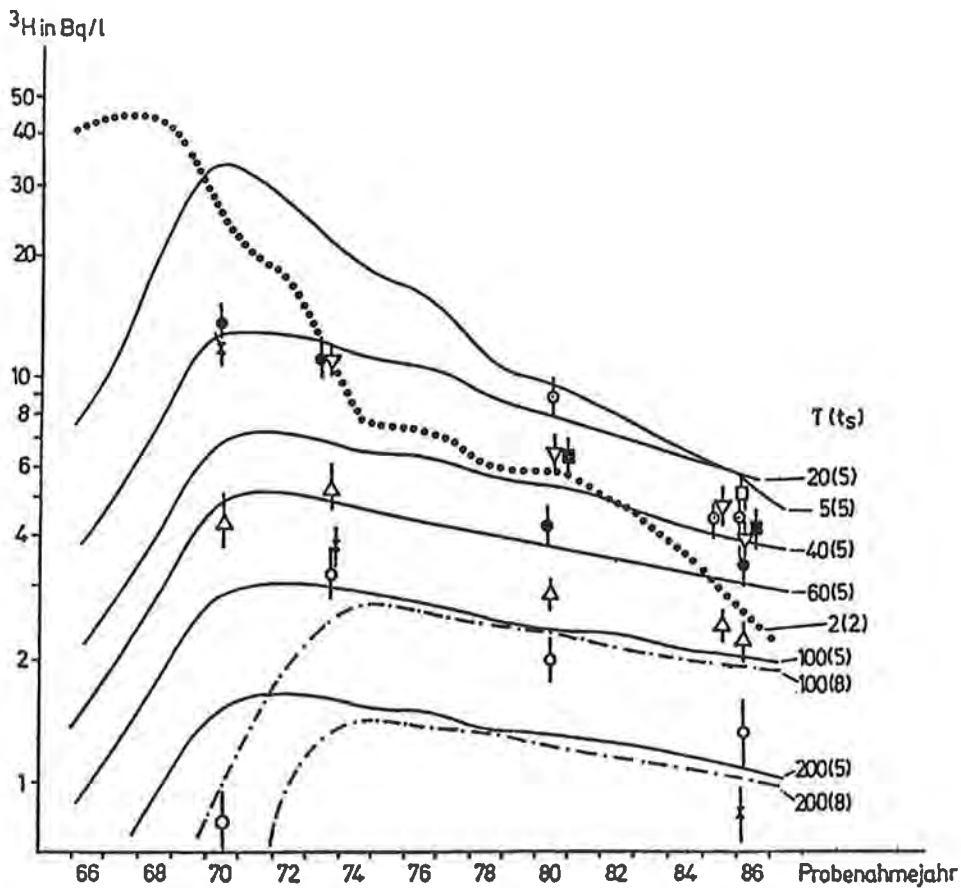
Bereits in früheren Arbeiten, wie z. B. durch K. FRÖHLICH & R. GELLERMANN (1989), wurden Tritiumuntersuchungen zur Hydrologie der Mineralwässer Bad Brambachs durchgeführt, um Schlußfolgerungen für den Quellschutz abzuleiten. In der genannten Arbeit wurden Tritiummeßwerte aus den Jahren 1969/70–1986 genutzt. Die Auswertung basierte auf folgender Modellvorstellung:

- Ein Piston-Flow-Modell widerspiegelt den Sickerprozeß durch die ungesättigte Bodenzone. Für die hier untersuchten Quellen wurde von Sickerzeiten von etwa 5 a bzw. 5–8 a (für die Radonquelle) ausgegangen.
- Der Sickerprozess wird durch ein in Reihe nachgeschaltetes Exponentialmodell dargestellt.

Die so erhaltenen Modellanpassungen sind in Fig. 20 dargestellt. Unter anderem wurde für die Eisenquelle wegen der schlechten Anpassung der Meßwerte an die Exponentialmodellkurve die Überlagerung zweier unterschiedlicher Fließregime postuliert.

Aus den abgeschätzten mittleren Verweilzeiten T des Exponentialmodelles, den Quellschüttungen Q , einer Grundwasserneubildungsrate $q = (1,5-2,2) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ und einer mittleren Porosität $n = 0,01$ wurde die effektive Dicke D_{eff} der grundwasserleitenden Schichten abgeleitet (siehe Tab. 4). Insbesondere aus der Größe des berechneten Jungwasseranteils α_{10} (siehe Gl. (10) sowie Tab. 4) wurde geschlossen, daß „mit dem Niederschlag einsickernde, durch Sorptions- und Abbauprozesse wenig beeinflussbare Schadstoffe relativ rasch und unverdünnt im Quellwasser wieder erscheinen“ können.

In der Folge dieser Arbeiten wurden die Tritiummessungen fortgesetzt, sodaß jetzt umfangreicheres Datenmaterial zur Verfügung steht.



Berechneter Verlauf der ^3H -Aktivitätskonzentration sowie gemessene ^3H -Werte
(T = mittlere Verweilzeit in α , t_s = Sickerzeit in α)

- Radonquelle, Δ obere Grenzquelle, ∇ untere Grenzquelle, \circ Wiesenquelle,
- Eisenquelle, \times Schillerquelle \square Bosequelle, \blacksquare Fischerquelle

Fig. 20: Modellanpassung für das EPM bei verschiedenen mittleren Verweilzeiten T des EM und Sickerzeiten t_s sowie ^3H -Meßwerte der untersuchten Quellen; aus K. FRÖHLICH & R. GELLERMANN (1989).

Model fitting for the EPM for several mean residence times T of the EM and percolation times t_s as well as tritium values of the investigated springs; from K. FRÖHLICH & R. GELLERMANN (1989).

Dieser Umstand sowie die mit dem Programm MULTIS (vgl. Abschnitt 5.1., 5.2.) verbundenen neuen Auswertemöglichkeiten gaben Anlaß für eine weiterführende Interpretation der Tritiummessungen im Rahmen dieser Arbeit.

Augenmerk gilt dabei sowohl einer genaueren Erfassung des Infiltrationsprozesses im Hinblick auf die Tritiumeintragskonzentration ins Grundwasser als auch einer quantitativen modellmäßigen Umsetzung der bereits diskutierten Überlagerung von Fließregimen, d. h. die Anwendung von parallel gekoppelten Modellen.

Tab. 4: Wesentliche Untersuchungsergebnisse nach K. FRÖHLICH & R. GELLERMANN (1989) für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Mineralwasserquellen in Bad Brambach. Main results for the investigated mineral springs in Bad Brambach, according to K. FRÖHLICH & R. GELLERMANN (1989).

	T [a]	α_{30} (%)	D_{eff} [m]
Radonquelle	150 ± 50	15–25	470–1400
Eisenquelle	100 (ca. 50 %)	ca. 60	200–250
Wiesenquelle	5 (ca. 50 %)		
Obere Grenzquelle	5 ± 2	100	15–50
Untere Grenzquelle	70 ± 10	30–40	
	30 ± 10	50–80	

Darüber hinaus sollen resultierende Modellfehler bzw. Lösungsbereiche näher in die Betrachtungen einbezogen werden.

3.3.1. Flache Mineralwasserquellen

Ausgehend von der eingangs beschriebenen hydrogeologischen Situation wird für die flachgefaßten Mineralwasserquellen folgendes Modell postuliert:

- Die relativ junge Grundwasserkomponente, die den oberflächennahen Lockergesteinen des Talbereiches zuzuordnen ist, wird durch ein in Reihe geschaltetes Exponential-Piston-Flow-Modell erfaßt. Der Modellanteil des Exponentialmodells widerspiegelt dabei das Infiltrationsgebiet; der Piston-Flow-Anteil gibt die Fließstrecke unter den abdeckenden tonig-schluffigen Sedimenten (vgl. Abschnitt 3.2.) wieder.
- Bei der über Klüfte zuzitenden alten Grundwasserkomponente (Tiefenwasser) kann von einer sehr hohen Verweilzeit ausgegangen werden, sodaß dieser Modellteil von einem „tritiumfreien Modell“ reflektiert wird. Es wurde ein Piston-Flow-Modell benutzt, dessen Verweilzeit keine Tritiumkonzentration in dieser Komponente zuläßt. Die im Kluftgrundwasserleiter wahrscheinlich wirkende Doppelporosität (Kluftporosität und Mikroporen in der Gesteinsmatrix) geht mit in dieses Modell ein.

Freie Modellparameter sind demnach:

- der Anteil des Piston-Flow-Modells, d. h. der „alten“ Komponente; daraus ergibt sich zwangsläufig der Anteil der jungen Komponente,
- die mittlere Verweilzeit des Exponential-Piston-Flow-Modells (EPM),
- der Anteil des Exponentialmodells (EM) am EPM.

Aus den beiden letztgenannten Größen kann man auf die mittlere Verweilzeit des EM schließen:

$$\overline{\tau}_{\text{EM}} = \overline{\tau}_{\text{EPM}} \cdot (\text{Anteil des EM am EPM}). \quad (11)$$

Bei der Anpassung eines dreiparametrischen Modells muß natürlich damit gerechnet werden, daß die erhaltenen Lösungen hochgradig mehrdeutig sein können. Diese Mehrdeutigkeit kann durch Einbeziehung zusätzlicher Informationen teilweise eingeschränkt werden. Im vorliegenden Fall wurden dazu folgende Kriterien herangezogen:

- a) Der Modellfehler, d. h. die mittlere quadratische Abweichung zwischen Modell-output und Meßwertset, ist im Lösungsbereich kleiner als der maximale Meßfehler (vgl. Abschnitt 2.4.2.3., Punkt 9).
- b) Für freie Grundwasserleiter, d. h. im konkreten Falle für den Teilbereich des Exponentialmodells, gilt die Beziehung:

$$\bar{\tau} = \frac{nH}{R}, \quad (12)$$

wobei n die effektive Porosität, R die Grundwasserneubildungsgeschwindigkeit und H die grundwassererfüllte Mächtigkeit sind.

Durch Einsetzen der Extremwerte $n: 0,05-0,3$, $H: 3-6$ m, $R: 100-300$ mm/a erhält man eine Spanne der möglichen mittleren Verweilzeit des Exponentialmodells von 0,5–18 a.

Bei den nachfolgenden Darstellungen der Modellanpassungen ist zu berücksichtigen, daß prinzipiell für alle Parameter ein gewisser Lösungsbereich gilt; aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden einige Parameter nur für die jeweils beste Modellanpassung dargestellt.

Radonquelle

Der Anteil der tritiumfreien Komponente beträgt nach Fig. 21 etwa 80–95 % bei einer mittleren Verweilzeit des EPM von etwa 10–27 a. Der Anteil des Exponentialmodells am EPM beträgt dabei zwischen 20 und 74 %. Die eingangs genannten Werte für Anteile von altem Wasser, das keiner Oberflächenbeeinflussung in Quellnähe unterliegt, werden u. a. durch die Tatsache gestützt, daß selbst ergiebige

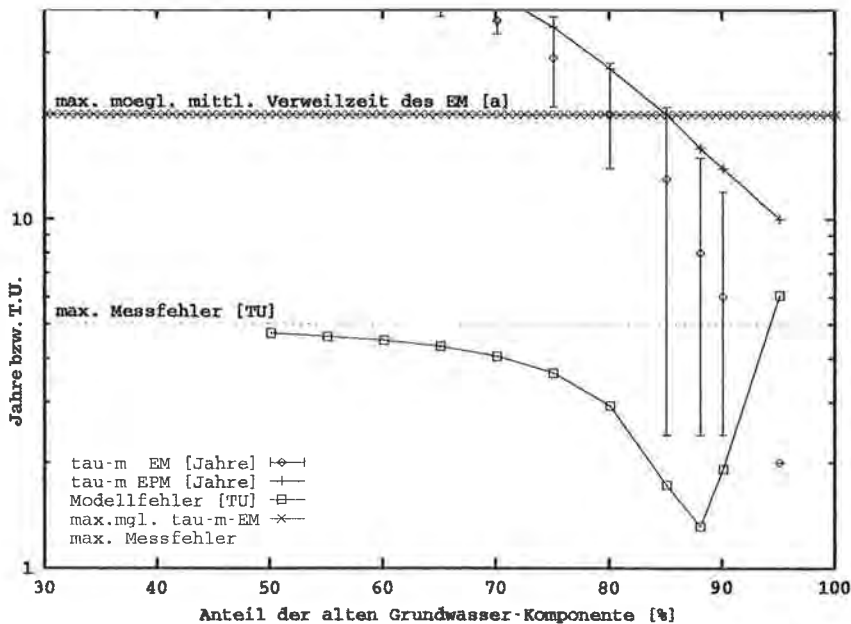


Fig. 21: Ergebnisse der Modellanpassung für die Radonquelle.
Results of the model fitting for the spring Radonquelle.

Niederschlagsereignisse keine meßbare Veränderung der Leitfähigkeit nach sich ziehen. Auch die geringe Schwankungsbreite der Wassertemperatur von 8–10° C (W. MICHLER, 1973) belegt eine überwiegende Beeinflussung durch tieferes Grundwasser.

Wiesenquelle

Die in untenstehender Grafik (Fig. 22) veranschaulichten Ergebnisse für die Wiesenquelle lassen eine relativ große Spannweite möglicher Lösungen erkennen: Zwischen 35 und 75 % kann demnach der Anteil der zuzitenden alten Grundwasserkomponente betragen.

Aus dem Leitfähigkeitswert von $0,35 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ist eher auf einen geringen Anteil der alten Mineralwasserkomponente zu schließen.

Zum Vergleich dazu die entsprechenden Werte für die anderen flachen Quellen: Radonquelle: $1,80 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, Eisenquelle: $1,20 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$. Gemessen bei jeweils 20° C, nach einer Heilwasseranalyse des Forschungsinstitutes für Balneologie und Kurortwissenschaft Bad Elster, 1987.

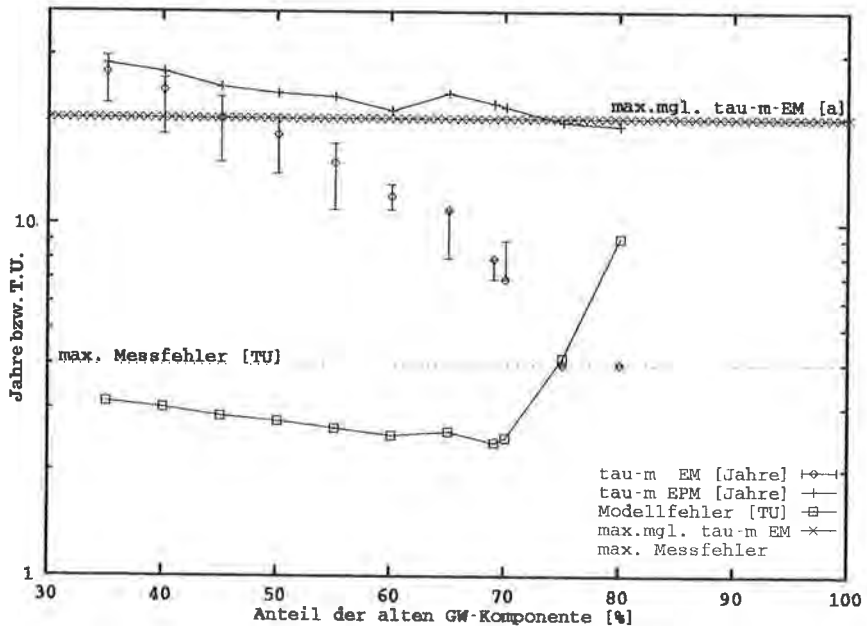


Fig. 22: Ergebnisse der Modellanpassung für die Wiesenquelle.
Results of the model fitting for the spring Wiesenquelle.

Eisenquelle

Bei formaler Anwendung der bisher verwendeten Modellkombination EPM + tritiumfreies Modell ergibt sich das in Fig. 23 veranschaulichte Lösungsbild mit 45–75 % Altwasseranteil. Jedoch sollte die besondere Lage dieser Quelle in der Nähe des Röthenbaches nicht unbeachtet bleiben.

Die Quelfassung befindet sich in ca. 4 m Abstand zum Bachlauf, im Gegensatz zu etwa 25 m bei den anderen Quellen. Das Auslaufniveau der Quelle liegt etwa 1,5 m unter dem Niveau der Vorflut. Somit ist eine Beeinflussung durch Bachwasser nicht auszuschließen.

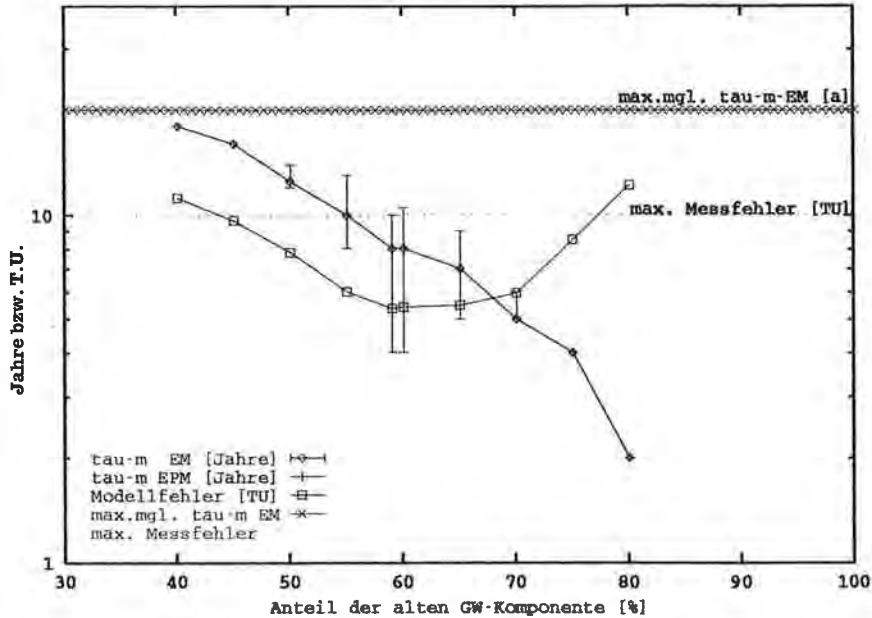


Fig. 23: Ergebnisse der Modellanpassung für die Eisenquelle (PM + EPM).
Results of the model fitting for the spring Eisenquelle (PM + EPM).

Ein möglicher Anteil dieser Komponente wird nachfolgend als „Uferfiltratsanteil“ bezeichnet.

Eine praktikable Möglichkeit zur modellhaften Erfassung dieser Komponente stellt im konkreten Beispiel die Nutzung des Tritiummeßwertes des Röthenbaches dar (vgl. Fig. 19). Von diesem ausgehend wurde eine mittlere Exponentialmodell-Verweilzeit von 18–22 Jahren abgeleitet.

Für die Abschätzung der Fließzeit von Bach zu Quelfassung kann mit

$$v_f = k_f \cdot i = (10^{-3} \dots 10^{-6} \frac{m}{s}) \cdot (\frac{1,5}{4}) \text{ und} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{4^2 + 1,5^2} \text{ m}}{v_f} = \frac{4,3 \text{ m}}{v_f}$$

ein Maximalwert von etwa vier Monaten abgeschätzt werden, der bei Vergleich mit der mittleren Verweilzeit des Bachwassers vernachlässigbar ist. Zur Erfassung der Uferfiltratskomponente genügt somit das Hinzufügen des alleinigen Exponentialmodells zum bisher verwendeten Modell.

Die dabei gewonnenen Lösungen sind hochgradig mehrdeutig, wie Fig. 24 zeigt. Allein mit Hilfe der Tritiummeßwerte kann der Anteil des Uferfiltrates nicht eingegrenzt werden. Geht man jedoch in Analogie zu den beiden vorangehend besprochenen Quellen davon aus, daß die Lösung im Bereich der geringsten mittleren Verweilzeit des Exponentialmodells liegt (sofern der Modellfehler dabei klein bleibt), so liegt der Uferfiltratsanteil am wahrscheinlichsten zwischen 30 und 40 % bei einem Anteil oberflächennahen Wassers von etwa 10–15 %. In diesem Lösungsbereich liegen die Anteile der Altwasserkomponente bei 40–60 % (30 % Uferfiltrat) bzw.

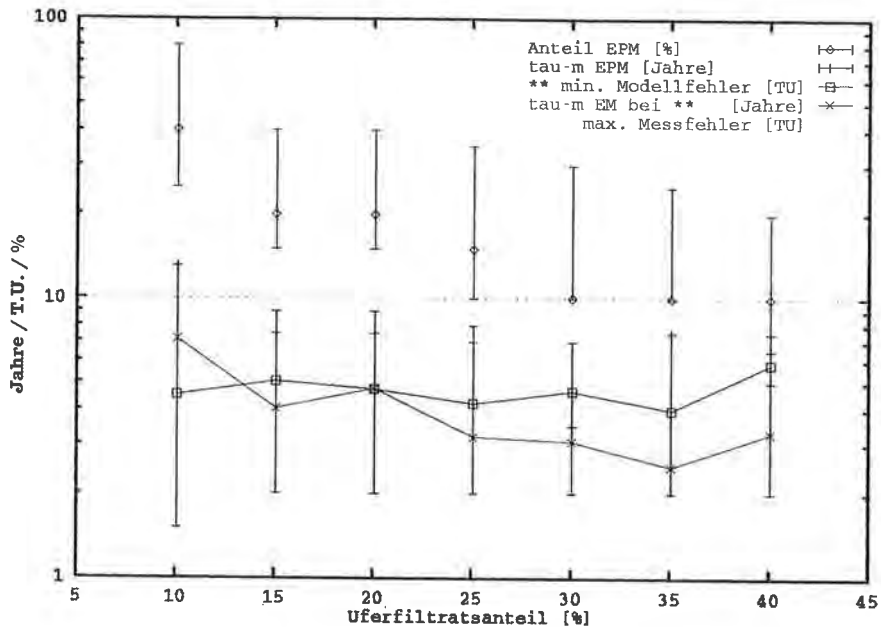


Fig. 24: Ergebnisse der Modellanpassung für die Eisenquelle: EPM (junge, oberflächennahe Komponente), EM (Infiltration aus dem Rötchenbach) und Tiefenkomponente (Anteil resultierend aus EPM und EM).

Results of the model fitting for the spring Eisenquelle: EPM (young, shallow component), EM (infiltration from the Rötchenbach) and deep component (portion results from the portions of EPM and EM).

> 40 % (40 % Uferfiltrat). Aus Uraniummessungen wurde ein entsprechender Anteil von etwa 50 % abgeleitet (R. GELLERMANN & K. FRÖHLICH, 1984).

Die für die flachen Quellen erhaltenen Anteile der alten Komponente am Quellwasser von 50 % und mehr mögen zunächst hoch erscheinen. Jedoch ist damit zu rechnen, daß ein Fremdzufuß von alten Grundwasserkomponenten bevorzugt im Talbereich – wo auch die Quellen situiert sind – erfolgt, da dort bedingt durch eine intensivere tektonische Zergliederung des Untergrundes die besseren Wasserwegsamkeiten vorhanden sind.

Es ist sogar wahrscheinlich, daß das Quellwasser deutlich höhere Anteile einer Tiefenwasserkomponente enthält als das Grundwasser des Talbereiches im Durchschnitt.

3.3.2. Bohrbrunnen

Im Gegensatz zu den flachgefaßten Mineralwasserquellen kann den Bohrbrunnen der Oberen und Unteren Grenzquelle wegen ihres Ausbaues nur unterhalb von etwa 60 m bzw. 40 m Teufe Wasser direkt zufließen bzw. hinter der oberen Verrohrung zum Filter zusickern. Die hydrogeologischen Verhältnisse an der Oberen Grenzquelle wurden durch P. SZYMCAK et al. (1992) im Rahmen eines Pumpversuches näher untersucht. Die Entwicklung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom hydraulischen Regime (vgl. Fig. 25) wird wie folgt interpretiert:

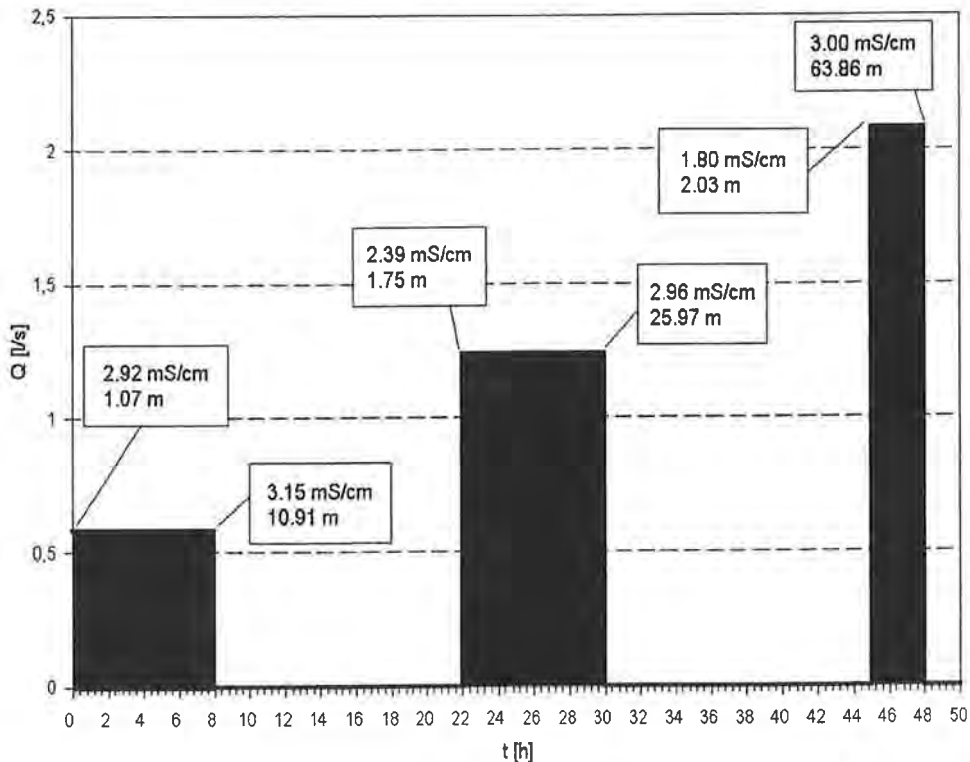


Fig. 25: Förderstrom, spezifische elektrische Leitfähigkeit und Absenkung (in m unter Geländeoberkante) an der Oberen Grenzquelle während eines Pumpversuches 1992.
Pumping rate, specific electric conductivity and drawdown (in m below surface) at the "Obere Grenzquelle" during a pumping test in 1992.

Die im Verlaufe einer Pumpstufe zunehmende Leitfähigkeit resultiert aus dem tiefer werdenden Absenke-trichter und dem dabei steigenden Anteil von tieferem, höher mineralisiertem Wasser im Förderstrom.

Nach dem Abschalten der Pumpe erfolgt eine Auffüllung mit vorwiegend oberflächennahem, gering mineralisiertem Grundwasser. Dies belegen die Leitfähigkeitswerte jeweils am Beginn der einzelnen Pumpstufen. Je mehr Wasser dem Reservoir insgesamt entzogen worden ist, um so geringer ist die Gesamtmineralisation bei „normaler“ Beanspruchung; P. SZYM CZAK et al. (1992) ermittelten eine praktische Maximalleistung des Brunnens von 1 l/s. Eine erhöhte Entnahme führt sehr wahrscheinlich zur Verringerung der Gesamtmineralisation des Wassers bzw. zur Überbeanspruchung des Brunnens.

Die besondere Problematik besteht bei den Grenzquellen im Förderregime: Täglich wird nur etwa 3–4 h lang Wasser gefördert. Dabei werden nur relativ geringe Mengen entnommen. Dieser Zustand ist also nur bedingt als stationär zu bezeichnen; die quellnah infiltrierende Oberflächenkomponente wird täglich neu aufgefüllt und abgepumpt.

Das instationäre Abpumpen führt zu einer gewaltsamen Anregung des Zuflusses der Jungwasserkomponente.

Bei der Modellwahl braucht eine Fließstrecke unter bedeckenden Sedimenten keine Berücksichtigung zu finden, da die Bewegung der jungen Komponente überwiegend vertikal erfolgt.

Somit setzt sich das Gesamtmodell aus einem Exponentialmodell für die junge Komponente und einem parallelgeschalteten tritiumfreien Modell für die Tiefenwasserkomponente zusammen. Bereits ein Blick auf die in beiden Aufschlüssen gemessenen Tritiumwerte (siehe Fig. 19) läßt einen augenscheinlich höheren Anteil der jungen Komponente in der Unteren Grenzquelle erkennen.

Nachfolgend sind die Gütefunktionen als Ergebnis der Modellkalibrierung für die Obere bzw. Untere Grenzquelle graphisch dargestellt (Fig. 26, Fig. 27,). Dabei

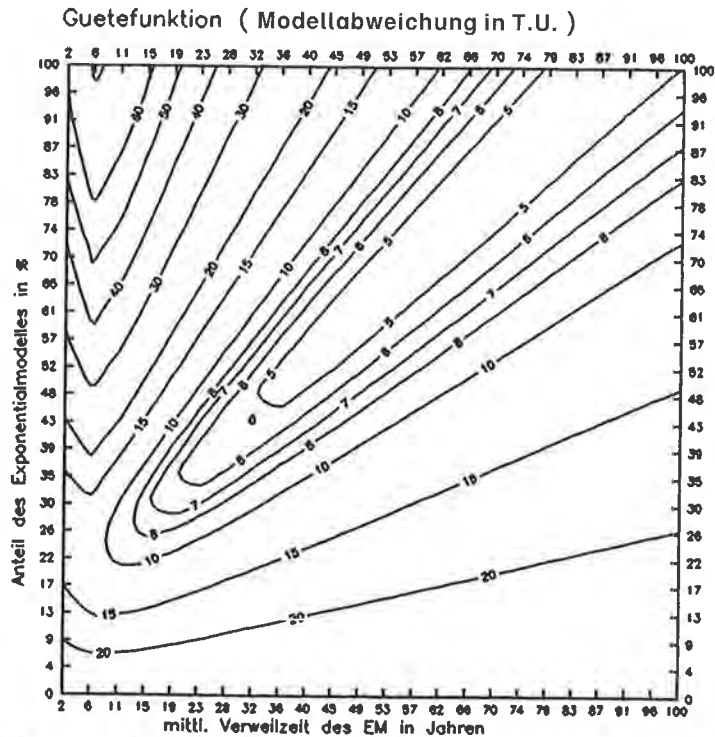


Fig. 26: Modellanpassung für die Obere Grenzquelle; beste Anpassung bei 52 a, 51 % mit 3,52 T.U. Modellfehler (max. Meßfehler = 6,0 T.U.).
 Model fitting for the "Obere Grenzquelle"; best fitting for 52 a, 51 % with 3,52 T.U. model error (max. measurement error = 6,0 T.U.).

sind die Werte der Modellparameter (horizontal: mittlere Verweilzeit des Exponentialmodelles, vertikal: Anteil des EM) an den Achsen aufgetragen. Die Isolinien im Zentrum stellen die Modellabweichungen in T.U. für die entsprechenden Parameterwerte dar.

Das Bild der Modellkalibrierung für die Obere Grenzquelle (Fig. 26) zeigt einen Lösungsbereich von ca. 20–100 a mittlerer Verweilzeit für die junge Komponente bei ca. 35–100 % für deren Anteil, d. h., je höher der Anteil der oberflächennahen Komponente ist, umso größer müßte deren mittlere Verweilzeit sein. Der relativ

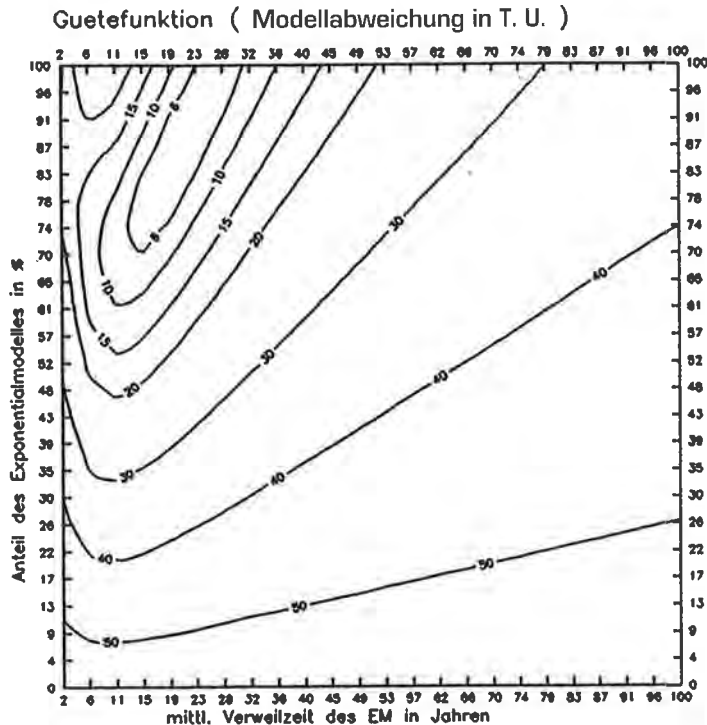


Fig. 27: Modellanpassung für die Untere Grenzquelle; beste Anpassung bei 21 a, 64 % mit 1,80 T.U. Modellfehler (max. Meßfehler = 10,0 T.U.).
 Model fitting for the "Untere Grenzquelle"; best fitting for 21 a, 64 % with 1,80 T.U. model error (max. measurement error = 10,0 T.U.).

hohe Wert der mittleren Verweilzeit läßt sich mit der geringen Durchlässigkeit des Festgesteinsgrundwasserleiters erklären.

Im Vergleich zur Oberen Grenzquelle wird in der Unteren Grenzquelle ein wahrscheinlich höherer Anteil Jungwasser gefördert, das außerdem eine kleinere mittlere Verweilzeit hat (siehe Fig. 27). Bei ähnlichen geologischen Bedingungen kann dies durch die geringere Entnahmetiefe bedingt sein.

Die Ergebnisse der Tritiumauswertung befinden sich damit im Einklang mit den Leitfähigkeitswerten aus dem Jahre 1987, die in der Oberen Grenzquelle mit $1,98 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ etwa doppelt so hoch liegen wie in der Unteren Grenzquelle mit $1,043 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$.

3.3.3. Zusammenfassung

Aus den für die Bad Brambacher Quellen berechneten Verweilzeitparametern sind folgende Jungwasseranteile α_{30} abzuleiten:

Radonquelle:	5–15 %,
Wiesenquelle:	25–50 %,
Eisenquelle:	25–50 %,
Obere Grenzquelle:	25–35 %,
Untere Grenzquelle:	55–80 %.

Es wird deutlich, daß keine der Quellen ausschließlich junges oder altes Wasser fördert, wobei die Radonquelle den höchsten Anteil geogen beeinflussten alten Wassers aufweist.

Die weitaus höchsten Jungwasseranteile werden in der Unteren Grenzquelle gefördert.

Aus Sicht des Quellschutzes ergeben sich aus den Tritiumuntersuchungen u. a. folgende Forderungen:

- a) Um den Zutritt der alten Tiefenwasserkomponente, die wahrscheinlich wesentlicher Träger der Mineralisation und der Radioaktivität ist, nicht zu beeinträchtigen, ist die Schaffung jeglicher zusätzlicher tiefer Wasserwegsamkeiten insbesondere im zentralen Talbereich (Bohrungen, Baugruben u. ä.) zu vermeiden.
- b) Da die mittlere Verweildauer der oberflächennahen Grundwasserkomponente (EPM) und damit auch das Migrationsverhalten möglicher Schadstoffe von der Ausbildung der hangenden Schutzschicht abhängt, sollte sie vor Beschädigungen bewahrt werden.

Zusammenfassend sind jeweils für die beste Modellanpassung die Meßwerte und der Modelloutput graphisch dargestellt (Fig. 28).

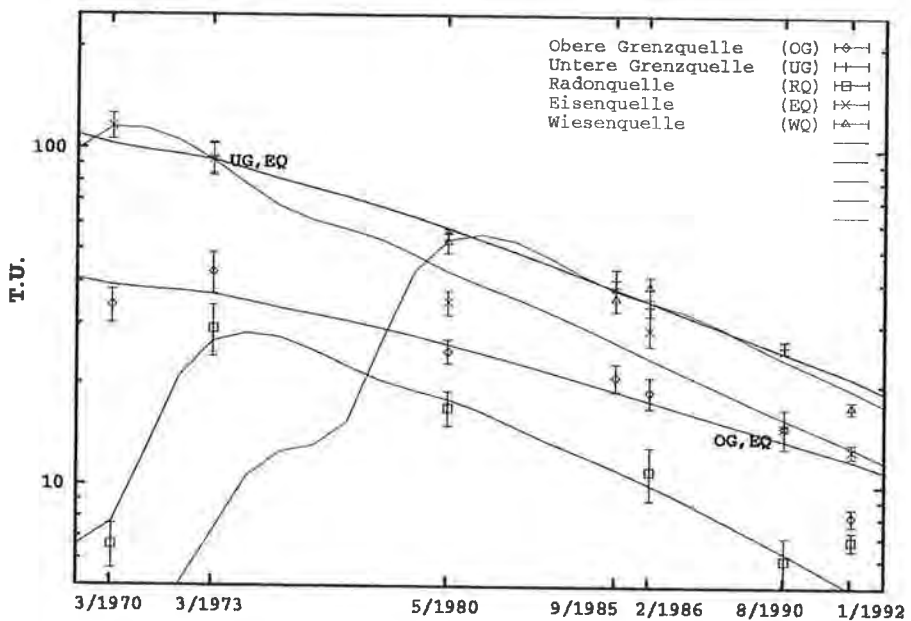


Fig. 28: Tritiummeßwerte und Modelloutput bei der jeweils besten Modellanpassung für die einzelnen Mineralwasserquellen.

Tritium measured values and model output for the best model fitting for the several mineral springs.

Daraus ergibt sich, daß die ermittelten Modellparameter allgemein eine relativ gute Anpassung an die Meßwerte liefern. Anhand dieses Untersuchungsbeispiels konnte die Leistungsfähigkeit des Programmes MULTIS nachgewiesen werden, indem es in rationeller Weise möglich war, erweiterte Modellvorstellungen zur Aus-

wertung von Isotopenmeßreihen umzusetzen. Es sollte jedoch nicht übersehen werden, daß dies allein noch kein Kriterium für die Güte einer Auswertung von Isotopenmeßwerten darstellt. Insbesondere für die Wiesenquelle weisen die Untersuchungsergebnisse verschiedener Messungen Widersprüche auf. Zum Beispiel deuten Uraniummessungen (R. GELLERMANN & K. FRÖHLICH, 1984) darauf hin, daß es sich überwiegend um junges Grundwasser handelt.

Hinweise zur Klärung solcher Widersprüche sollten im Rahmen künftiger Arbeiten in einer näheren Untersuchung der oberflächennahen Grundwasserkomponente gesucht werden. Diese wirkt vermutlich durch saisonale und Mengeneffekte störend auf die Auswertung von Tritiummessungen. Aus einem Monitoring für Deuterium und ^{18}O sind zumindest halbquantitative Hinweise auf die mittleren Verweilzeiten dieser Komponente für die einzelnen Quellen zu erwarten (vgl. z. B. P. MAŁOSZEWSKI et al., 1983).

4. Möglichkeiten und Grenzen der Neubildungsabschätzung aus Grundwassertritiumdaten in ariden Gebieten anhand eines Fallbeispiels

4.1. Problemstellung und Einführung in das Untersuchungsgebiet

4.1.1. Problemstellung

Das betrachtete Untersuchungsgebiet umfaßt einen großen Teil der Provinz Dundgobi (Mittelgobi) bzw. des Aimags Mandalgov der Mongolei (Fig. 29., Fig. 30). „Mongolei“ ist die offizielle Staatsbezeichnung seit 13. 2. 1994. Offizielle Staatsbezeichnung bis dahin war „Mongolische Volksrepublik“ (MVR). Ein Aimag ist eine Verwaltungseinheit der Mongolei.

In dieser Provinz herrscht bereits gegenwärtig eine z. T. schwierige Situation bei der Wasserversorgung. Da der Wasserversorgung bei der künftigen Entwicklung der Besiedelung und der Infrastruktur eine zentrale Rolle zukommt, wurde im Rahmen des bis zum Jahre 2000 gerichteten Nationalen Wasserprogrammes ein gemeinsames Untersuchungsprogramm mit der IAEA initiiert. Ein Ziel des Programmes besteht in der Einschätzung des Grundwasserdargebotes hinsichtlich Menge und Beschaffenheit in sechs Teilregionen, um Schlußfolgerungen für die Planung der Wasserversorgung ableiten zu können. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden in den Jahren 1988 und 1990 regional wichtige Aufschlüsse für isotopische und chemische Analysen beprobt.

Mit der Auswertung der gewonnenen Daten wurden im Rahmen vorliegender Arbeit folgende Hauptziele formuliert:

1. Einschätzung der beprobten Grundwasserressourcen hinsichtlich Genese, Neubildungsbedingungen und Beschaffenheit, um Schlußfolgerungen für die weitere Bewirtschaftung ableiten zu können. Dieser Aspekt trägt sehr speziellen und ortsbetonten Charakter. Die Erfüllung dieser Aufgabe ist an Umfang und Qualität der verfügbaren hydrogeologischen Randinformationen gebunden. Wie dies auch in zahlreichen ariden Gebieten von Entwicklungsländern der Fall ist, liegen solche Zusatzinformationen nur begrenzt vor. Die Isotopenmethodik soll in diesem Rahmen mit relativ geringem Aufwand einen Beitrag zur Abschätzung der ge-

nannten Größen liefern, in Kenntnis darüber, daß der quantitative Charakter der gewonnenen Aussagen in Relation zur Beschaffenheit der Ausgangsinformationen zu sehen ist.

2. Dabei ist die Ableitung von Aussagen über die Anwendbarkeit und Genauigkeit der Isotopenmethodik in Abhängigkeit von der Güte verfügbarer hydrogeologischer Informationen von besonderem Interesse.



Fig. 29: Lage des Zentrums des Untersuchungsgebietes Mandalgov, der meteorologischen Station Sajnschand sowie der bisher umweltisotopisch untersuchten Gebiete in der Mongolei. Situation of the center of the investigation area, Mandalgov, the meteorological station Sajnschand and the regions investigated by environmental isotopes in Mongolia.

3. Neben der Untersuchung von lokal interessierenden Fragestellungen sollen Zusammenhänge und Hypothesen allgemeinerer Art abgeleitet werden. Dies betrifft insbesondere Beziehungen zwischen isotopischer und hydrochemischer Zusammensetzung des Grundwassers und hydrogeologischer Situation. Hierbei gilt es beispielsweise zu untersuchen, ob und in welcher Weise Einflüsse, die einen mehr oder weniger starken Bezug zu isotopischen Merkmalen haben, mit hydrochemischen Merkmalen korrespondieren.

Gewonnene Ergebnisse bzw. Hypothesen stehen für Vergleiche mit Resultaten aus ähnlichen Gebieten zur Verfügung und können gegebenenfalls bestätigt oder konkretisiert werden.

4.1.2. Klima und Hydrologie

Innerhalb des kontinentalen Klimas, von dem das Territorium der Mongolei beherrscht wird, gehört das Untersuchungsgebiet zur Zone des kalten Steppenklimas bzw. in seinem südöstlichen Teil zur Zone des kalten Wüstenklimas (SEEWETTERAMT HAMBURG, 1993).

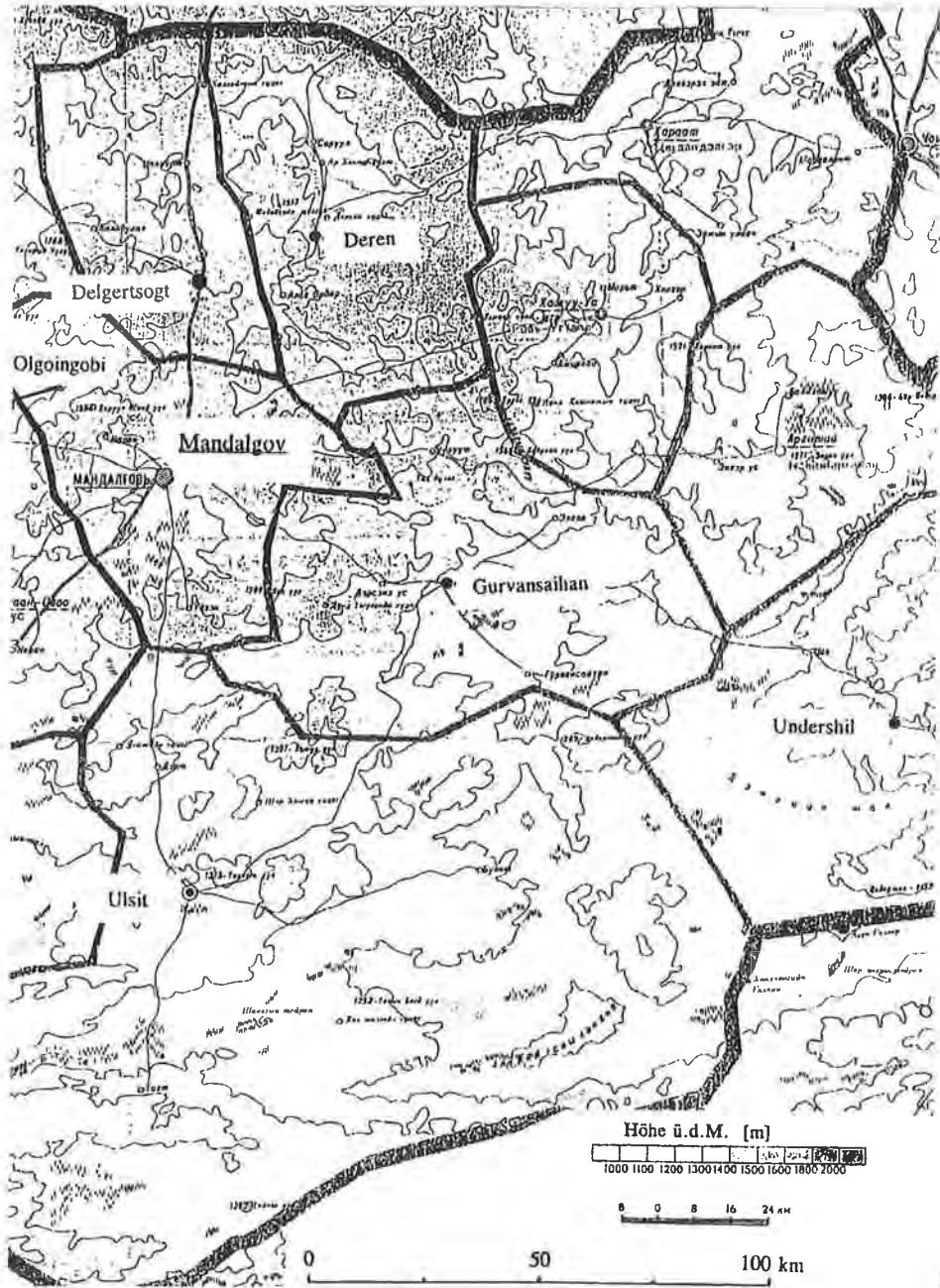


Fig. 30: Übersichtskarte des Aimags Mandalgov (Provinz Dundgobi) mit der Lage der Teiluntersuchungsgebiete (topographische Grundlage: Reliefkarte des Aimag Dundgov, im Maßstab 1 : 800 000, Ulan-Bator, 1987).
 General map of the aimag Mandalgov (Dundgobi province) with the locations of the investigation areas (topography based upon relief map of the aimag Dundgov, scale 1 : 800 000, Ulan-Bator, 1987).

Die Winter sind durch extreme Niederschlagsarmut, sehr tiefe Lufttemperaturen, häufige Windstille und geringe Bewölkung charakterisiert, während in den warmen Sommermonaten mit vorherrschend wechselhaftem Wetter West- und Nordwestwinde den Hauptteil der Niederschläge bringen.

Die Monatsmittel der Lufttemperatur liegen nur zwischen April/Mai und September/Oktober über dem Gefrierpunkt. Sie erreichen 20° C bzw. 24° C im Juli als wärmsten Monat und im Dezember/Januar -20° C. Dabei weist die etwas südöstlich vom Untersuchungsgebiet gelegene Station Sajnschand die höheren Werte auf (Fig. 31).

Die meteorologischen Angaben beziehen sich auf langjährige Beobachtungen der Stationen Mandalgov (1350 m NN) bzw. Sajnschand (991 m NN). (Siehe Fig. 29.)

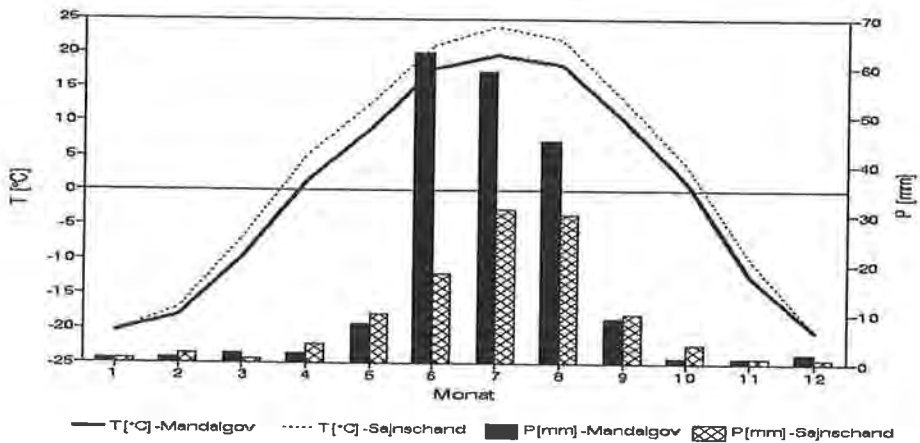


Fig. 31: Monatsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag für die Stationen Mandalgov (1350 m NN) und Sajnschand (991 m NN).

Monthly mean values of temperature and monthly total precipitation for the stations Mandalgov (1350 m a.s.l.) and Sajnschand (991 m a.s.l.).

Die unterschiedliche meteorologische Situation dieser beiden Orte zeigt sich auch in der Jahressumme der mittleren Niederschlagshöhe: sie beträgt in Mandalgov 192 mm und in Sajnschand 115 mm. Dabei ist jahreszeitlich eine sehr ungleiche Verteilung der Niederschlagsmengen zu beobachten (Fig. 31). In den Monaten Juni bis August fallen 87 % (Mandalgov) bzw. 69 % (Sajnschand) des Jahresniederschlags. Zwischen Oktober und April sind die mittleren Monatssummen des Niederschlages nicht größer als 2 mm bzw. 4 mm.

Ausgehend von den verfügbaren Monatsmittelwerten langjähriger Beobachtungen für Lufttemperatur und Luftfeuchte sowie Werten für maximal mögliche Sonnenscheindauer und Globalstrahlung wurde die potentielle Verdunstung abgeschätzt (siehe Abschnitt 5.5.1.). Erwartungsgemäß treten die höchsten Werte in den Sommermonaten auf und übersteigen bei weitem die Niederschlagshöhen (Fig. 32).

Die potentielle Verdunstung liegt demnach für Mandalgov bei etwa 625 mm/a und 934 mm/a für Sajnschand. Diese Werte stehen im Einklang mit den in A. BAUMGARTNER & H.-J. LIEBSCHER (1990) S. 355 (rund 750 mm/a) bzw. den im Nationalatlas der MVR (rund 600 mm/a im N und rund 1000 mm/a im S) verzeichneten Beträgen der potentiellen Verdunstung für dieses Gebiet.

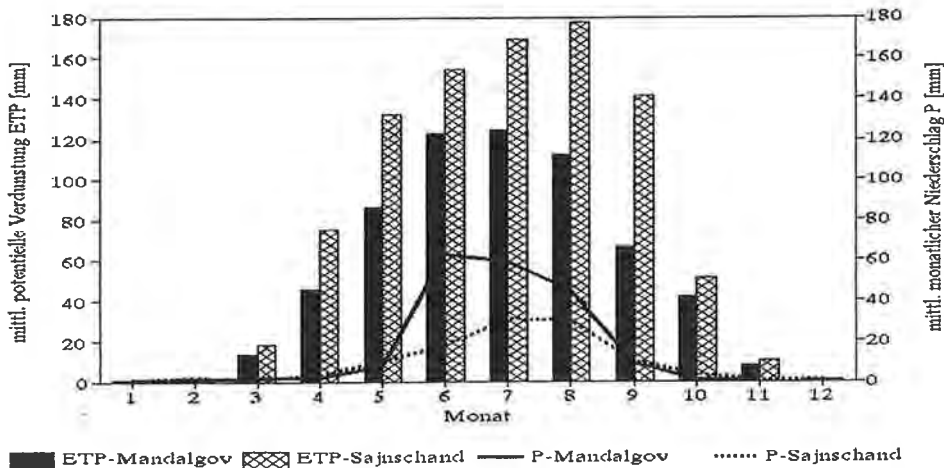


Fig. 32: Abgeschätzte Werte der potentiellen Verdunstung für Mandalgov und Sajschand.
 Estimated values of potential evaporation for Mandalgov and Sajschand.

Die genannten Werte belegen den ariden Charakter des Klimas im Untersuchungsgebiet, der entsprechend der regionalen Zonierung des Klimas in südlicher Richtung zunimmt. Die Dundgobi-Provinz ist ein Teil der Zentralasiatischen Senke, in dem keine permanenten Gewässer existieren.

4.1.3. Grundzüge der geologisch-hydrogeologischen Situation

Zur Geologie und Hydrogeologie der Mongolei wurden bereits zahlreiche grundlegende Werke veröffentlicht. Diese sind in Verbindung mit der intensiven Kartierungs- und Erkundungstätigkeit sowjetischer Geologen, vorwiegend in den 50er bis 70er Jahren, zu sehen. Stellvertretend sei hier auf die Werke von N. A. MARINOV & V. N. POPOV (1963), N. A. MARINOV (1966), N. A. MARINOV et al. (1970), N. A. MARINOV et al. (1977) verwiesen. Zur Entwicklung des Quartärs publizierten N. A. LOGATCHOV et al. (1989) moderne Erkenntnisse. Die Mineralwässer des N und NE des Landes wurden durch E. V. PINNEKER (1980) an ausgewählten Aufschlüssen isotopisch untersucht.

Letzterer gibt auch eine Zusammenstellung von Werken zur Hydrogeologie, die nur begrenzte Verbreitung erfahren haben dürften. Übersichtskarten existieren u. a. in Form des NATIONALATLAS DER MVR (1990), der von B. I. PISARSKIJ et al. (1983) vorgelegten Karte der Mineralwässer der MVR und als geologische Karte im Maßstab 1 : 500 000 (siehe Abschnitt 5.4.). Detaillierteres Kartenmaterial ist nur sehr begrenzt verfügbar, bedingt durch einen relativ niedrigen Untersuchungsgrad. Eine Darstellung der geologischen Situation, die den Anforderungen an eine (semi-)quantitative Auswertung isotopehydrogeologischer Messungen gerecht wird, ist mit dem verfügbaren Material nicht möglich. Dazu wären u. a. geologische und topographische Karten in einem geeigneten Maßstab hilfreich, womit eine Zuordnung von Neubildungsgebieten erleichtert wird. Hierin ist ein generelles Problem in Entwicklungsländern zu sehen, sodaß es gilt, mit vorliegenden Randinformationen zu einer optimalen Auswertung eigener Untersuchungen zu gelangen. Dem Zweck der Arbeit und der Qualität der verfügbaren Quellen angemessen, wird nachfolgend ein geologischer Überblick auf der Grundlage der obengenannten Werke gegeben.

Da nach Kenntnis des Autors bisher noch keine Werke zur Geologie der Mongolei nach moderner plattentektonischer Theorie erschienen sind, lehnt sich die folgende Beschreibung an die bislang übliche Terminologie an.

Grundsätzlich umfaßt das Untersuchungsgebiet zwei tektonisch-strukturelle Großeinheiten:

- den kaledonisch (hier: kambrisch) geprägten Nordteil mit dem Zentral-Gobi-Block, einem Segment des Zentralmongolischen Faltenystems und
- den im Oberdevon bis Oberkarbon orogen überprägten Südteil mit dem Suchebator-Block, einem Teil des Südmongolischen Faltenystems.

Diese beiden Bereiche werden durch die „Undurshillinsker“ Störungszone (möglicherweise Überschiebungsbahn des Süd- auf den Nordteil) getrennt. Die ältesten im Untersuchungsgebiet anstehenden Gesteine stellen archaisch-frühproterozoische Granulite, Gneise und Amphibolite im südwestlichsten Ausläufer des Kerulen-Argun-Massivs dar. Die Entwicklung des Nord- und des Südteiles verlief bis zum Oberkarbon getrennt und erfolgte ab dieser Zeit im wesentlichen einheitlich. Die geologische Situation (Fig. 51) ist als Ergebnis dieser Entwicklung anzusehen. Die abgebildeten stratigraphischen Einheiten werden nachfolgend zusammenfassend behandelt.

Die präorogene vendokambrische Sedimentation im **Nordteil** charakterisieren karbonatische und terrigen-klastische Bildungen. Mittel- bis oberkambrische Granodiorit-Intrusionen kennzeichnen das Ausklingen der intrakambrischen Orogenese. Auf eine längere Sedimentationsunterbrechung folgen devonische vulkanosedimentäre bis terrigen-klastische, z. T. kohleführende Sequenzen. Die Genese devonischer granitoider Intrusiva im Nordteil kann als Folge einsetzender Kollisionsprozesse im Südmongolischen Faltengebirge angesehen werden.

Die präorogene Sedimentation im **Südteil** umfaßt silurische bis unterkarbonische marin-karbonatische und terrigen-klastische Folgen. Bedeutsam sind basische und saure Effusiva im Silur und Unterdevon. Die Deformation dieser Einheiten erfolgte im Oberdevon bis Oberkarbon.

Die **gemeinsame postkarbonische Entwicklung** kennzeichnen magmatische und terrestrisch-sedimentäre Komplexe. Markant sind intermediär bis saure Effusiva des Ostmongolischen Vulkanitgebirges. Dabei sind im Untersuchungsgebiet permische Effusiva am weitesten verbreitet. Jurassisch-kretazische basische bis saure Effusiva stellen die westlichen Ausläufer eines großen gleichaltrigen Effusivkomplexes dar, dessen Genese an arkogene Prozesse gekoppelt ist. Weitverbreitet sind kretazische terrigene Klastika. Zusammenhängende größere Areale quartärer Ablagerungen sind laut geologischer Karte eher selten. Im Widerspruch dazu stehen vor Ort gemachte Beobachtungen (S. SANJDORJ, 1993, W. WEBER et al., 1988), nach denen pleistozäne Schotterterrassen und Lößablagerungen ausgedehnte Flächen bedecken.

Die **hydrogeologische Situation** (nach S. SANJDORJ, 1993) ist in Grundzügen in allen Teiluntersuchungsgebieten ähnlich und wie folgt zu beschreiben: Im Ausbiss meist paläozoischer Festgesteine wird der Hauptteil des Grundwassers durch Versinkung gebildet, welches am Fuß der Hügel/Berge oder in einiger Entfernung davon aus Brunnen gefördert wird. Der Anteil des hypodermischen Abflusses ist unter den gegebenen ariden Verhältnissen wahrscheinlich von untergeordneter Bedeutung. Dabei fördert ein Teil der Brunnen direkt aus dem Festgesteinskörper, ein Teil erschließt nur das auflagernde Deckgebirge. Darüber hinaus wurden einige Brunnen direkt in den oberen Bereichen der aus kristallinen Gesteinen bestehenden

Anhöhen und Hochebenen niedergebracht. Die beschriebene Situation ist schematisch in Fig. 33 dargestellt.

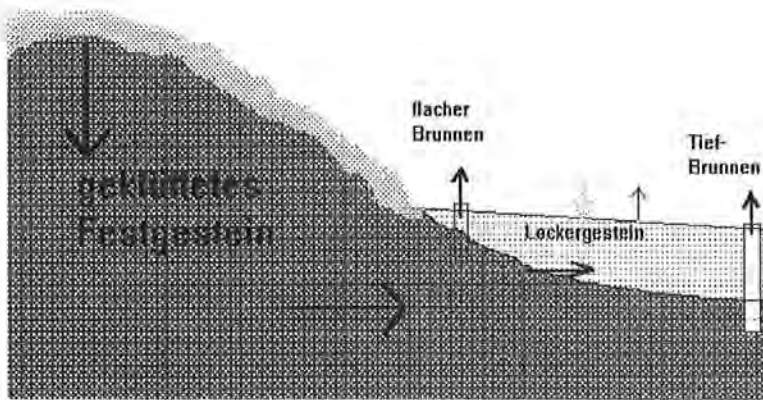


Fig. 33: Schema der grundsätzlichen hydrogeologischen Situation vieler Brunnen im Untersuchungsgebiet.
Scheme of the basic hydrogeological situation of many wells in the investigation area.

Typisch für die Region ist die Bildung temporärer Seen in Talsenken nach Regenereignissen. Infolge des hohen Tonanteils in den obersten Bodenschichten verdunstet das darin enthaltene Wasser fast vollständig, ohne daß eine Speisung des obersten Grundwasserleiters stattfindet.

Die Angaben zur geologischen Einordnung der einzelnen Aufschlüsse stehen z. T. nicht im Einklang mit den Angaben der geologischen Karte.

4.2. Durchgeführte Beprobungen und Einschätzung des gewonnenen Datenmaterials

Die Beprobung der Aufschlüsse des Untersuchungsgebietes erfolgte in zwei Etappen:

- Vom 1. bis 8. 10. 1988 wurden in den Teiluntersuchungsgebieten Deren, Deltgertsogt und Ulsit Proben gemeinsam von der IAEA und dem Institut für Wasserprobleme des Staatlichen Komitees der MVR entnommen.
- Im Rahmen von geophysikalischen Felduntersuchungen des Instituts für Wasserprobleme wurden vom 10. 5. bis 26. 10. 1990 Proben in den Teiluntersuchungsgebieten Gurvansaihan, Undershill, Mandalgov und Olgoingobi gesammelt.

Insgesamt liegen von 95 Grundwasseraufschlüssen Ergebnisse isotopischer und chemischer Analysen vor.

Ferner wurden 1988–1990 28 Niederschlagsproben in Mandalgov gesammelt, die isotopisch untersucht wurden.

Alle Proben wurden chemisch und hinsichtlich ihres Gehaltes an Tritium, Deuterium und ^{18}O im Labor der IAEA in Wien analysiert. Darüber hinaus erfolgte an ausgewählten Aufschlüssen eine Beprobung auf Radiokohlenstoff. Zwischen der Beprobung und der Analyse lag ein Zeitraum von 12 bzw. 14 Monaten, der z. T. durch Transportverzögerung bedingt war.

Daher muß davon ausgegangen werden, daß sich bei fehlender Stabilisierung der Proben chemische Parameter bis zur Analyse im Labor z. T. sekundär verändert haben. Abgeleitete Aussagen sind unter diesen Randbedingungen zu sehen.

Ausgewählte Aspekte lassen sich höchstens aus einzelnen Komponenten (z. B. Nitrat) oder Tendenzen beurteilen. Ungeachtet dessen wurde ein Algorithmus entwickelt, der bei repräsentativen hydrochemischen Meßwerten durch Kombination mit isotopischen Werten zur Erhöhung der Aussagefähigkeit chemischer Parameter beitragen kann.

Die gewonnenen Meßwerte sind in Abschnitt 5.3. aufgeführt.

4.3. Grundsätzliche Bemerkungen zur Grundwasserneubildung unter ariden Bedingungen

Da sich die meteorologischen Verhältnisse in Trockengebieten grundlegend von denen im humiden Klima unterscheiden, ist in ariden Regionen prinzipiell mit anderen Arten der Grundwasserneubildung zu rechnen. Vor der Interpretation der Isotopendaten seien grundlegende Besonderheiten der Grundwasserneubildung vorangestellt. Ausgehend von Untersuchungen in der Negev-Wüste fanden A. S. ISSAR et al. (1985) folgende Hauptmechanismen der Grundwasserneubildung:

1. Direkte Infiltration kann bei Abwesenheit einer Pflanzendecke in unbedeckten Sandgebieten bei schweren Regenfällen (mehr als etwa 2 mm Niederschlag pro Ereignis) stattfinden.
2. An der Oberfläche von anstehendem Festgestein oder blockbedeckten Hügeln kann es nach einer kurzen Strecke oberflächigen Fließens zur Infiltration durch Klüfte kommen.
3. Großflächige Überschwemmungen, die intensiven Regenfällen folgen, können zur Grundwasserneubildung beitragen.

Im Beispiel der zitierten Untersuchungen war der erstgenannte Mechanismus **prinzipiell** der für die Neubildung ergiebigste, während die Bedeutung des letzten Aspektes relativ gering war, weil nur wenige Regenereignisse die entsprechende Niederschlagsmenge erbrachten.

Aufgrund der hydrogeologischen Situation im Untersuchungsgebiet (vgl. Fig. 33) wird davon ausgegangen, daß die Aufragungen des Festgesteins die größte Bedeutung für die Grundwasserneubildung besitzen. Wegen der intensiven Verwitterungsprozesse ist jedoch damit zu rechnen, daß weniger die direkte Versinkung über Klüfte eine dominierende Rolle spielt. Vielmehr ist anzunehmen, daß das Festgestein mit einer mehr oder weniger mächtigen Schicht aus Versatzmaterial bedeckt ist. Die Dicke dieser Bedeckung entscheidet in wesentlichem Maße, welche Niederschlagsereignisse zur Grundwasserneubildung beitragen. Dies gilt in ähnlicher Weise für den Lockergesteinsbereich.

4.4. Auswertung der isotopischen und hydrogeochemischen Daten

4.4.1. Bisherige isotopehydrogeologische Untersuchungen in der Mongolei

Vereinzelte isotopehydrogeologische Untersuchungen sind in der Mongolei seit mehreren Jahren durchgeführt worden. Großregionale Forschungsvorhaben rea-

lisierten A. P. CHAUSTOV et al. (1985). In der Nord- und Ostmongolei nahmen V. V. ROMANOV et al. (1989) Tritiumproben aus:

- sieben Oberflächengewässern (75–160 T.U.);
- 10 känozoischen (sedimentären) Aquiferen (0–125 T.U.);
- acht kretazischen und paläozoischen (sedimentären) Aquiferen (0–56 T.U.); als einziger Aufschluß, der auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelt wird, wurde in Mandalgov der 136 m tiefe Brunnen M 3 beprobt (1 ± 2 T.U.);
- neun Grundwasserleitern granitoider bzw. effusiver Gesteine (1–106 T.U.).

Als Hauptergebnisse dieser Arbeit wurden mit Hilfe des Exponential-, des Linear- und des Linear-Piston-Flow-Modells mittlere Verweilzeiten von bis zu 1000 a abgeschätzt.

Außerdem wurden allgemeine Aussagen über die Grundwasserneubildung und -zirkulation abgeleitet.

Im Rahmen der Untersuchung von Mineralwässern (siehe Fig. 29) führten E. V. PINNEKER et al. (1991) Beprobungen für die Messung von ^{18}O , Deuterium, ^{87}Sr und ^3He durch. Im Ergebnis dieser Arbeiten wurde u. a. eine von N nach S hin zunehmende Anreicherung an Deuterium und ^{18}O in den Grundwässern gefunden.

Isotopenhydrogeologische Untersuchungen zum Nachweis von Grundwasservorräten führten T. KRAUSE et al. (1979) an einem Einzelobjekt durch. Auf der Grundlage einer Reihe von Tritium-, ^{14}C - und ^{13}C -Messungen an Grund- und Oberflächenwässern wurden Schlußfolgerungen zur Geschütztheit des Grundwassers gezogen und eine Neubildungsrate von maximal 2 mm/a ermittelt.

4.4.2. Auswertung der Deuterium- und ^{18}O -Werte

Der Nutzen der Anwendung dieser Umweltnuklide basiert im wesentlichen auf deren Isotopenfraktionierung im Ergebnis verschiedener Prozesse, deren Wirkung auf die Isotopenzusammensetzung des Niederschlags durch folgende „Effekte“ beschrieben wird (B. E. MAZOR, 1991): Temperatureffekt, Mengeneffekt, Kontinentaleffekt, Höheneffekt, Verdunstungseffekt.

Wesentliche Einflüsse auf die Zusammensetzung meteorischer Wässer spiegeln sich im $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ -Diagramm wider. Figur 34 zeigt dieses Diagramm für die analysierten Grund- und Niederschlagswässer. Zur Orientierung wurden die World (Global) Meteoric Water Line nach H. CRAIG (1961) sowie zwei Local Meteoric Water Lines eingezeichnet, davon die erste unter Berücksichtigung aller Niederschlagsproben.

Da keine Angaben über die Menge der einzelnen Niederschlagsereignisse vorliegen, wird in Analogie zu den Untersuchungsergebnissen von J. R. GAT (1992) davon ausgegangen, daß die isotopisch relativ schweren Niederschläge (in der Grafik rechts oben, eingerahmt), von verhältnismäßig unergiebigem Ereignissen stammen, die infolgedessen nicht zur Grundwasserneubildung beitragen.

Die Anreicherung schwerer Isotope in diesen Niederschlägen ist auf die Fraktionierung während der Verdunstung beim Fallen des Niederschlages zurückzuführen.

Da eine Einordnung der isotopischen Zusammensetzung der Grundwässer in Relation zu Wässern erfolgen sollte, die zur Neubildung beitragen, wurde aus den Niederschlagswerten mit $\delta^{18}\text{O} < -6 \text{ ‰}$ eine zweite Local Meteoric Water Line

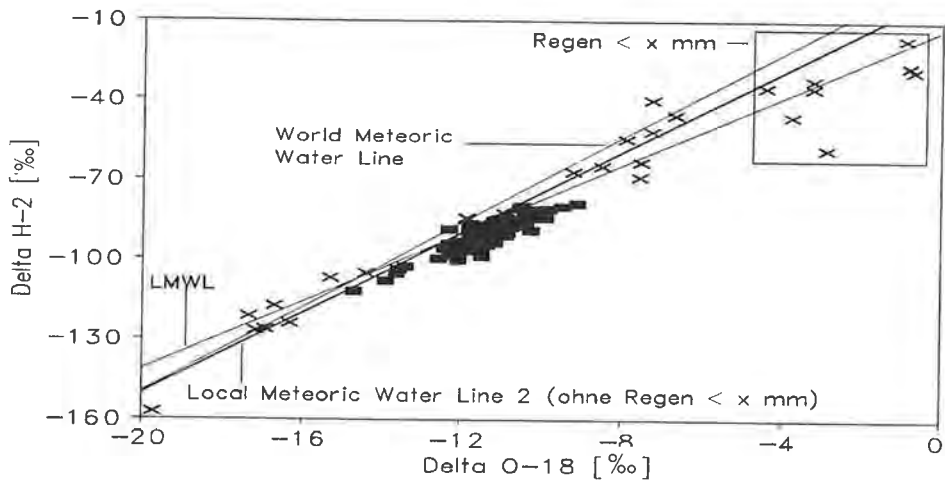


Fig. 34: Einordnung der Niederschlagswässer (x) und Grundwässer (■) im $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ -Diagramm. Plotting of meteoric water samples (x) and ground water samples (■) in the $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ -diagram.

abgeleitet. Die in Fig. 34 dargestellten Geraden gehorchen somit folgenden Beziehungen:

$$\begin{aligned} \text{World (Global) Meteoric Water Line: } \delta D &= 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰}, \\ \text{Local Meteoric Water Line: } \delta D &= (6,4 \pm 0,3) \delta^{18}\text{O} - (14,3 \pm 9,3 \text{‰}), \\ \text{Local Meteoric Water Line 2: } \delta D &= (7,5 \pm 0,4) \delta^{18}\text{O} - (1,1 \pm 6,7 \text{‰}). \end{aligned}$$

Wie die Abbildung erkennen läßt, liegen die Grundwasserproben zum großen Teil unterhalb der drei Geraden. Für diese Differenzierung zwischen der isotopischen Komposition der Grund- und Niederschlagswässer kommen vor allem folgende Ursachen in Betracht:

- das Vorhandensein von Paläowässern, die unter anderen (kühleren) klimatischen Bedingungen als den heutigen gebildet wurden,
- die Isotopenfraktionierung bei der Evaporation aus oberflächennahen Bereichen.

Die erstgenannte Hypothese kann für die untersuchten Wässer mit Wahrscheinlichkeit abgelehnt werden, da die isotopisch leichtesten Wässer Tritium in z. T. beträchtlichen Konzentrationen enthalten.

Für die beprobten Wässer kann zusammenfassend eingeschätzt werden, daß die **lokale Differenzierung** der Grundwässer in ihrer Signatur stabiler Isotope in wesentlichem Maße durch das beschriebene Wirken des Mengen- und des Verdunstungseffektes determiniert ist.

Die im Diagramm in Fig. 35 gekennzeichneten Proben Deren 15, 16, 18, 20, Undershill 1 und Delgertsøgt 4 sind somit vermutlich Zeugnis schwerer Regenereignisse, während die Wässer der Brunnen Ulsit 11, 12 und Undershill 17 wahrscheinlich ein hohes Maß evaporitischer Beeinflussung reflektieren. Es fällt auf, daß Wässer der Region Ulsit offenbar stärker als Grundwässer anderer Gebiete von Verdunstungsprozessen beeinflusst sind.

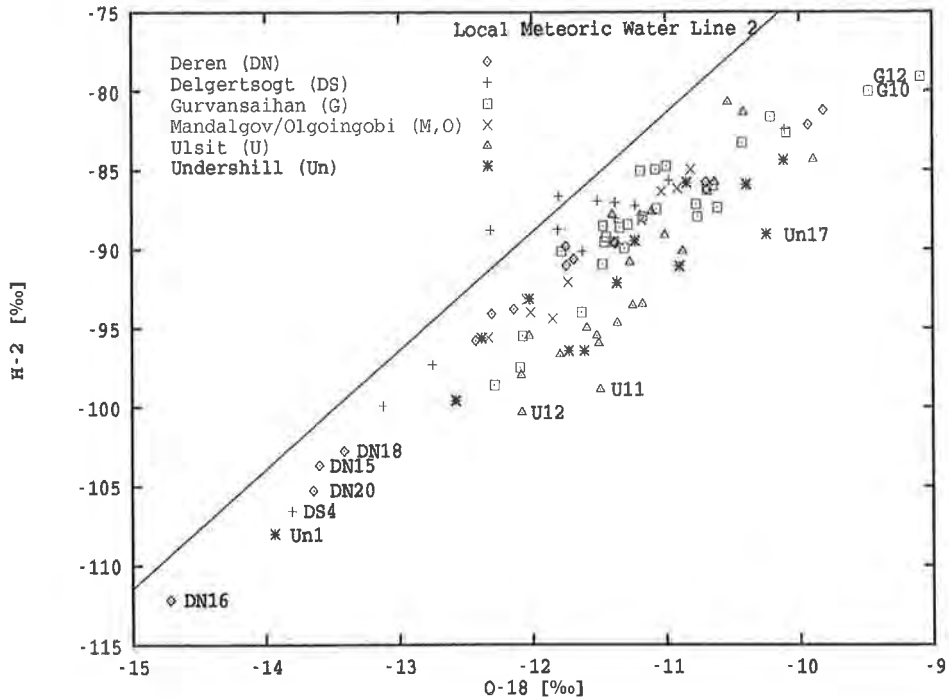


Fig. 35: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ -Diagramm der Grundwässer aus den verschiedenen Teiluntersuchungsgebieten. $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ -diagram of groundwaters from the several parts of the investigation area.

4.4.3. Bildung der Tritiuminputfunktion

Zur Auswertung des Tritiumgehaltes der Grundwasserproben ist es zunächst erforderlich, den aus dem Niederschlag stammenden isotopischen Eintrag ins Grundwasser, die sog. Inputfunktion, abzuschätzen sowie die isotopische Zusammensetzung der meteorischen Wässer zu ermitteln.

Eine praktikable und effiziente Methode zur Ableitung einer Modellfunktion für die Tritiumkonzentration im Niederschlag wurde von C. S. DONEY et al. (1992) vorgestellt.

Leider ist diese Methode jedoch nicht auf Stationen anwendbar, für die nur Meßreihen im Zeitraum \approx 1970 bis 80er Jahre vorliegen. Zur Bildung der Tritiuminputfunktion kann daher nur Bezug auf die Datenaufzeichnungen der nächstgelegenen Tritiummeßstation Irkutsk genommen werden. Für diese wurden Meßwerte des Tritiumgehaltes im Niederschlag für die Jahre 1969–1983 aufgezeichnet (IAEA, 1992).

Eine logarithmische Korrelation mit der Aufzeichnungsreihe Ottawa auf der Basis von Monatsmittelwerten liefert folgende Beziehung (vgl. auch Fig. 36):

$$\lg(^3\text{H}_{\text{Irkutsk}}) = (1,02 \pm 0,11) \cdot \lg(^3\text{H}_{\text{Ottawa}}) + (0,30 \pm 0,21 \text{ T.U.}) \text{ mit } r = 0,93.$$

Die aus einer Gletscherbeprobung im Mongolischen Altai berechneten Werte (K. FRÖHLICH, 1993) bestätigen prinzipiell die Richtigkeit der Verwendung der entsprechenden Werte von Irkutsk, sodaß eine gesonderte Berücksichtigung dieser

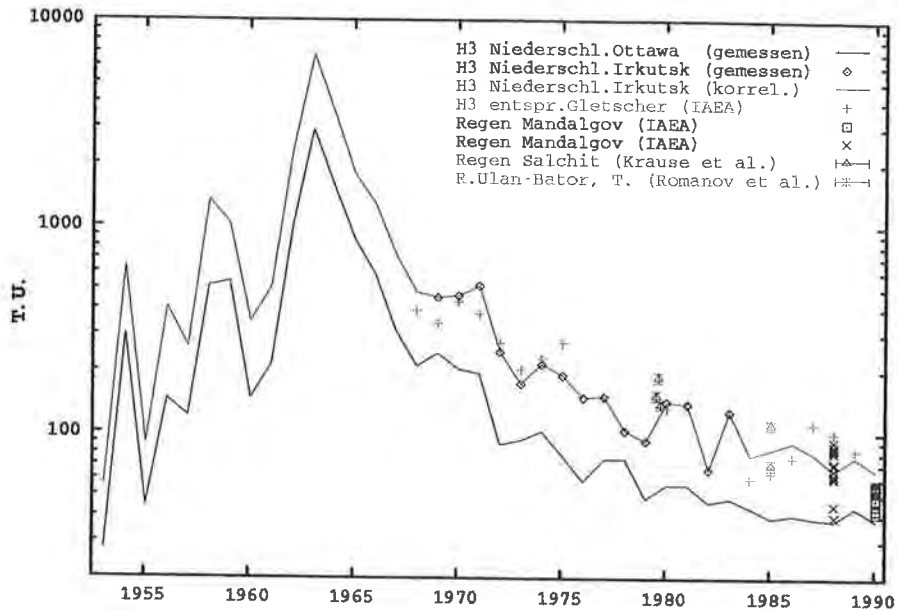


Fig. 36: Gemessene und korrelierte Tritiumwerte im Niederschlag verschiedener Stationen sowie aus einer Gletscherbeprobung im Altai ermittelte Werte.
 Measured and correlated tritium values in precipitation from several stations as well values from a glacier sampling in the Altai Mountains.

Werte nicht notwendig ist. Im Vergleich zu mitteleuropäischen Verhältnissen ist die Tritiumkonzentration im Niederschlag der Region damit relativ hoch. Als Ursache hierfür kommt u. a. die Tritiumemission aus chinesischen Kernwaffenversuchen in Betracht.

Aus den Monatsmittelwerten der potentiellen Verdunstung und der Niederschläge (Fig. 32) ist bereits zu vermuten, daß bei durchschnittlichen meteorologischen Verhältnissen keine Grundwasserneubildung möglich ist.

Dies wurde auch durch Testrechnungen mit den genannten Werten sowie den entsprechenden langjährigen Monatsmitteln für Sonnenscheindauer und Luftfeuchte bestätigt.

Obwohl in Ermangelung meteorologischer Daten nicht selten das sogenannte „Alpha-Konzept“ (vgl. Abschnitt 2.4.1.1.) zur Ableitung der Tritiuminputfunktion angewandt wird, erscheint dessen Verwendung unter den beschriebenen Bedingungen nur bedingt berechtigt.

Um den eingangs genannten drei Hauptmechanismen der Grundwasserneubildung gerecht zu werden, ist es für eine (semi-)quantitative Auswertung von Grundwassermeßwerten eigentlich erforderlich, Tritiumfunktionen separat für diese drei Regimes abzuleiten und anzuwenden.

Für die Neubildung durch Klüfte von Festgesteinsoberflächen stellen die Verwendung der Reihe der Tritiumkonzentration im Niederschlag (vgl. z. B. K. FRÖHLICH et al., 1987) bzw. die Anwendung des beschriebenen Alpha-Konzeptes mit $\alpha = 1$ geeignete Näherungen dar.

Diese sollten jedoch nicht bei vorhandener Lockergesteinsbedeckung verwendet werden.

Bei Kenntnis der meteorologischen Tageswerte sind Abschätzungen der Größenordnung von Inputereignissen im Zusammenhang mit Überflutungen („Floods“) und der Ausbildung temporärer Fließgewässer denkbar. Für die Infiltration durch eine Lockergesteinsaerationszone erscheint die Ableitung einer Tritiuminputfunktion am ehesten realisierbar zu sein.

Im vorliegenden Fall wurden dazu die konkreten Monatswerte (für jeden Monat der Jahre 1953–1990) der entsprechenden meteorologischen Größen verwendet. Aus Werten der meteorologischen Stationen Mandalgov und Sajnschand wurden für verschiedene Mächtigkeiten der Aerationszone (Bodenart Sand) Inputfunktionen berechnet (Fig. 37). Dafür wurde eine modifizierte Version von BMI-BOWAM-2 (siehe Abschnitt 5.2.) benutzt, bei der die Parameter für Strahlung, Pflanzenbedeckung usw. entsprechend den örtlichen Gegebenheiten eingesetzt wurden.

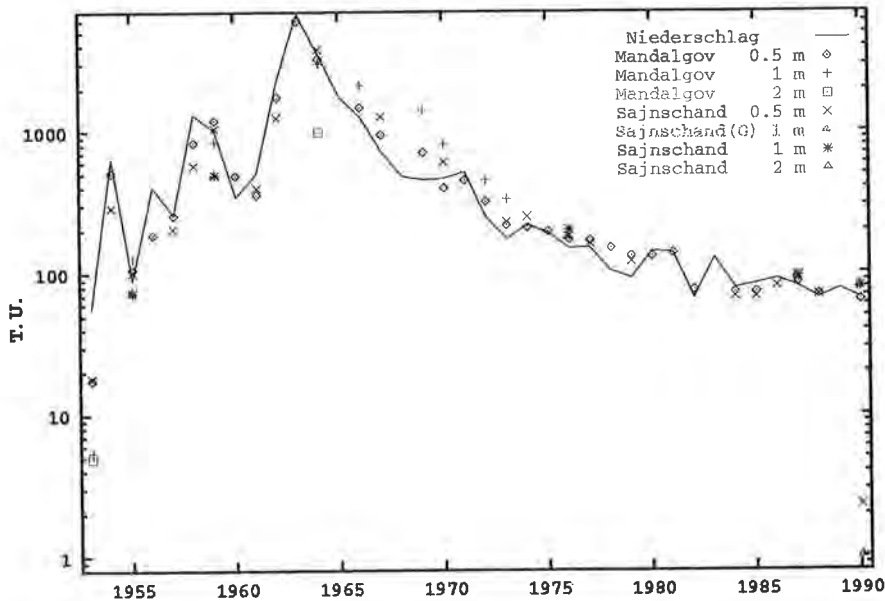


Fig. 37: Inputfunktionen für verschieden mächtige Aerationszonen (Werte der meteorologischen Stationen Mandalgov und Sajnschand) sowie die Tritiumkonzentration im Niederschlag. Input functions for different thicknesses of the unsaturated zone (values of the meteorological stations Mandalgov and Sajnschand) as well as tritium concentrations in precipitation.

Bei der Interpretation der Inputreihen ist zu beachten, daß nur Monatsmittel in die Kalkulation einfließen konnten. Zunächst fällt die relativ gute Übereinstimmung zwischen den berechneten Inputkonzentrationen und der Tritiumkonzentration im Niederschlag auf. Jedoch ist nicht zu verkennen, daß einige Lücken in den Inputreihen vorhanden sind, die darauf hindeuten, daß nicht in jedem Jahr eine Grundwasserneubildung stattfindet. Es ist möglich, daß bestimmte Neubildungs-episoden damit nicht erfaßt werden können. Diese Lücken wirken sich bei der Anwendung der Inputfunktionen aus. Allerdings muß berücksichtigt werden, daß – wie bereits erwähnt – nur Monatsdurchschnittswerte Verwendung finden konnten. Die auffallenden negativen Differenzen zwischen der Tritiumkonzentration im Niederschlag und im Input sind zum einen durch die zeitliche Verzögerung der

Tritiumimpulse während der Infiltration und zum anderen durch deren unterschiedliche Wichtung entsprechend verschiedener hydrologischer Größen (u. a. Niederschlagsmenge, Verdunstungshöhe) bedingt.

Gemäß der geographischen Lage werden für die Teiluntersuchungsgebiete Ulsit und Undershill Inputfunktionen verwendet, die aus Werten der Station Sajnschand gebildet wurden; für die restlichen Gebiete kommen Inputfunktionen für Mandalgov zur Anwendung.

4.4.4. Abschätzung der Grundwasserneubildung mit „nichtisotopischen“ Methoden

Als Anhalts- und Vergleichswerte seien Abschätzungen für die Grundwasserneubildungsgeschwindigkeit nach anderen Verfahren gegeben:

- a) Das an anderer Stelle beschriebene konzeptionelle Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAM nach V. DUNGER (1989) liefert in einer entsprechend modifizierten Version als langjährige Mittel für die Bodenart Sand die in Tab. 5 zusammengefaßten Werte.

Tab. 5: Abschätzung der langjährigen mittleren Neubildungsraten nach BMI-BOWAM-2 für verschieden mächtige Aerationen bzw. Lockergesteinsbedeckungen.
Estimation of the long term mean recharge rates, determined by BMI-BOWAM-2 for different values of thickness of the unsaturated zone or loose rock cover.

maximale Entzugstiefe (m)	nach meteorologischen Werten für Sajnschand [mm/a]	nach meteorologischen Werten für Mandalgov [mm/a]
0,5	16	38
1	3	8
2	0,1	2

- b) Extrapoliert man die von W. KRAFT & D. SCHRÄBER (1982) publizierten Schlüsselkurven für die Grundwasserspende in Abhängigkeit von tektonischer Beanspruchung und Niederschlag, so erhält man für das Festgestein bei Niederschlägen von 100–150 mm/a in grober Näherung eine Neubildungsrate von 20–80 mm/a. Allerdings ist zu beachten, daß dieses Verfahren nur für humide Gebiete entwickelt wurde. Insofern sollten die genannten Werte nur als Maßstab für die Größenordnung maximal möglicher Neubildungsbeträge gesehen werden.

4.4.5. Abschätzung der Grundwasserneubildung mit Hilfe der Tritiummeßwerte

Grundlage der Neubildungsabschätzung bildet die vorangehend beschriebene Formel:

$$\bar{\tau} = \frac{n H}{R}, \quad (14)$$

wobei n die effektive Porosität, R die Grundwasserneubildungsrate und H die grundwassererfüllte Mächtigkeit eines unbedeckten Grundwasserleiters sind. Aus der Bedeutung dieser Parameter erwachsen neben den bereits genannten weitere Schwierigkeiten:

- Der Gültigkeitsbereich beschränkt sich auf das Infiltrationsgebiet. Der Lockergesteinsbereich nach Fig. 33 kommt prinzipiell nur sehr untergeordnet als Neubildungsgebiet in Frage (vgl. Tab. 5), d. h., es ist der effektive Bereich des Festgesteins zu berücksichtigen; dessen Erfassung ist jedoch nur in grober Näherung möglich.
- Die Porosität soll für das Festgestein mit rund 5 % angenommen werden, eine Angabe für das Lockergestein ist schwierig, da der erste Teil des Fließweges in den meisten Fällen auch im Festgestein liegt und die Sedimente heterogen zusammengesetzt sind. Es wird von einer Spanne von 5–20 % effektiver Porosität ausgegangen.
- In Ermangelung präziser Informationen wird die Mächtigkeit als Aquifermächtigkeit im Aufschluß eingesetzt (vgl. Tab. 14).
- Der Beitrag der Isotopenauswertung sollte in der Bestimmung der mittleren Verweilzeit für das **Infiltrationsgebiet (!)** bestehen. A priori liefern die verschiedenen Modelle die mittlere Verweilzeit für das gesamte System.

Bereits an dieser Stelle wird deutlich, daß die Neubildungsabschätzung bei den vorhandenen hydrogeologischen Randinformationen nur semi-quantitativen Charakter haben kann. Sie ist jedoch bei Ergänzung des Kenntnisstandes (Beschaffenheit des Infiltrationsgebietes und des Grundwasserleiters) präzisierbar.

Die Abschätzung von mittleren Verweilzeiten basiert auf folgenden Grundlagen:

1. Wahl des Modells: Grundsätzlich kann nur ein solches Modell Verwendung finden, für dessen Parameter repräsentative Informationen verfügbar sind.
 - a) Für die 1990 beprobten Aufschlüsse liegen zusätzliche Informationen als Angaben zur minimalen und maximalen Entfernung der Brunnen vom Neubildungsgebiet vor. Daher kann hier das Exponential-Piston-Flow-Modell zur Anwendung kommen. Dazu wurde aus den genannten Werten der Anteil des Exponentialmodells am Gesamtmodell ermittelt (siehe Tab. 17, rechte Spalte).
 - b) Für die 1988 beprobten Brunnen liegen die in Tab. 18 aufgelisteten Angaben vor, die die prinzipielle Verwendbarkeit des Exponential-Piston-Flow-Modells bestätigen, die quantitative Einschätzung des zweiten Modellparameters aber kaum gestatten. Daher wurde eine Auswertung mit dem Exponentialmodell vorgenommen und Vergleichswerte mit dem Exponential-Piston-Flow-Modell bestimmt. Die Problematik bei der Nutzung des Exponential-Piston-Flow-Modells besteht u. a. darin, daß bei einem großen Anteil des Piston-Flow-Modells, im „Exponential-Teil“, durchaus eine relativ kleine mittlere Verweildauer vorliegen kann, die Tritiumkonzentration im Brunnen aber trotzdem nahe 0 ist.
2. Wahl der Inputfunktion:
 - a) Zur Widerspiegelung des Eintrags in **Festgestein** – das in der Regel mit losen Verwitterungsprodukten bedeckt ist – werden Inputfunktionen verwendet, die für eine 0,5 m mächtige sandige Aerationzone berechnet wurden. Dabei wird davon ausgegangen, daß nach dem Durchsickern der Verwitterungszone das Wasser Klufthohlräume ausfüllt, aus denen ein kapillarer Aufstieg stark erschwert ist.
 - b) Da im **Lockergesteinsbereich** damit zu rechnen ist, daß bei episodischen Neubildungsereignissen der Grundwasserflurabstand kurzzeitig verringert ist und, wie die folgenden Grafiken veranschaulichen, bei einem Grundwasserflurabstand von 2 m selbst im Lockergesteinsbereich gemessene Tritiummeßwerte nicht mehr interpretierbar sind, wird für die Auswertung von Proben auf Inputfunktionen für eine 1 m mächtige Aerationzone zurückgegrif-

fen. Aus der Lage der einzelnen Brunnen in Bezug auf das Neubildungsgebiet ist jedoch zu schlußfolgern, daß selbst bei „Lockergesteinsaufschlüssen“ die Speisung in enger Beziehung zu angrenzenden Festgesteinskörpern steht, sodaß die Anwendung einer Inputfunktion nach a) mindestens die gleiche Berechtigung hat. Für Lockergesteinsaufschlüsse wurden daher zwei Inputfunktionen, nämlich für 0,5 bzw. 1 m Mächtigkeit, zur Anwendung gebracht, die natürlich eine gewisse Spannbreite für die mittlere Verweilzeit mit sich bringen.

3. Die aus dem Exponential-Piston-Flow-Modell resultierenden mittleren Verweilzeiten müssen mit Hilfe von Gl. (11) in die mittlere Verweilzeit des Exponentialmodells zurücktransformiert werden.

4.4.5.1. Auswertung der Tritiumdaten der 1988 beprobten Aufschlüsse

In Fig. 38 werden die Meßwerte in Relation zu den Inputfunktionen für verschieden mächtige Aerationen entsprechend der Werte zweier meteorologischer Stationen gezeigt.

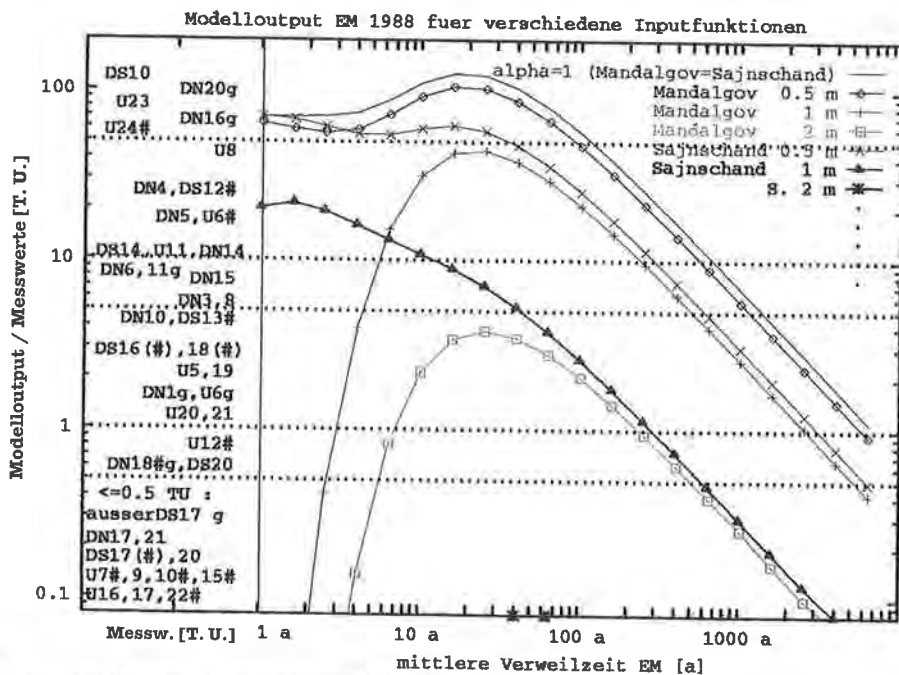


Fig. 38: Modelloutput für das EM 1988 bei verschiedenen Inputfunktionen; links Meßwerte an den einzelnen Aufschlüssen, dabei bedeuten „g“ gespannt, „#“ Festgestein, „DN“ Deren, „DS“ Delgertsogt, „U“ Ulsit.
 Model output for the EM 1988 for several input functions, left: measured values at the individual wells with „g“ – confined ground water, „#“ – well in hard rock, „DN“ – Deren, „DS“ – Delgertsogt, „U“ – Ulsit.

Proben, deren Tritiumkonzentration < 5 T.U. ist, werden nicht in die weitere Bearbeitung einbezogen. Für flache, ungespannte Grundwässer, die den Annahmen des Exponentialmodells genügen, impliziert ein niedriger Tritiumgehalt mit hoher

Wahrscheinlichkeit sehr schlechte Neubildungsbedingungen. Dies betrifft hier die Brunnen Delgertsogt 17, Ulsit 1 und 3.

Für tiefe bedeckte Grundwasserleiter ist bei geringer Tritiumkonzentration zwar eine geringe Neubildung wahrscheinlich, jedoch kann die oben getroffene Aussage nicht pauschal wiederholt werden, ist doch trotz relativ guter Neubildungsbedingungen eine beträchtliche Verweilzeit im Aquifer möglich. In diesen Fällen ist eine detaillierte Prüfung anhand von Zusatzinformationen nötig (Ausdehnung des Speisungsgebiets, Kontrolle mit anderen Isotopen mit größerer Halbwertszeit). Die genannte Kategorie umfaßt die Brunnen (Deren) DN 17, DN 21 sowie (Ulsit) U 7, U 9, U 10, U 15, U 16, U 17, U 22.

Adäquat zu den verfügbaren Informationen wird für flache Aufschlüsse bis zu einer Teufe von 10 m das Exponentialmodell verwendet; für tiefere Aufschlüsse werden als Vergleich zusätzlich mittlere Verweilzeiten mit dem Exponential-Piston-Flow-Modell und je 50 % Anteil der Teilmodelle bestimmt.

a) Festgesteinsbereich

Gemäß den verfügbaren Informationen über die Zuordnung der Aufschlüsse (siehe Tab. 14, Tab. 18, Anhang) wird folgenden Brunnen der Festgesteinstyp zugeordnet und damit die entsprechenden Porositäten und Inputfunktionen verwendet: (Deren) DN 18; (Delgertsogt) DS 10, DS 12, DS 13; (Ulsit) U 5, U 6, U 8, U 12, U 22, U 24. An dieser Stelle sei betont, daß u. U. weitere Brunnen zum Festgestein zu zählen sind, deren Zuordnung aufgrund fehlender oder fraglicher Angaben (Ansprache des Bohrgutes beim Bohrprozeß) nicht möglich ist.

Die graphische Darstellung der Datierungsergebnisse in Fig. 39 gestattet die Einschätzung der Neubildungsraten für die einzelnen Aufschlüsse und die verwendeten grundwassererfüllten Mächtigkeiten bei einer Porosität von 5 %. Bei niedrigeren Porositäten sind die Linien gleicher Neubildung entsprechend nach oben verschoben anzusetzen.

Diese Art der Darstellung gestattet sowohl die Einschätzung der Sensibilität der beteiligten Parameter gegenüber der Höhe der ermittelten Neubildungsrate als auch eine Zuordnung bei veränderten Werten, z. B. für die Mächtigkeit und Porosität nach detaillierteren Informationen ortskundiger Geologen.

Die Kreuze markieren mittlere Verweilzeiten, die bei Auswertung mit dem EPM und 50 % Exponentialmodell-Anteil für die jeweils darunter eingezeichnete Probe resultieren. Wie bereits aus Fig. 38 (links oben) deutlich wird, sind die hohen Tritiumwerte der Brunnen DS 10 und U 24 nicht mit dem Exponentialmodell interpretierbar; für ihre Interpretation wird nur das Exponential-Piston-Flow-Modell genutzt.

Folgende Aussagen sind abzuleiten:

1. Das Ergebnis der Einschätzung der mittleren Verweilzeit im Infiltrationsgebiet (also nicht die Datierung des Grundwassers schlechthin!) hängt maßgeblich von der Wahl des Berechnungsmodells ab. Unkenntnis der Entfernung und Ausdehnung des Neubildungsgebietes kann für tiefe Aufschlüsse zu einer Abweichung des Datierungsergebnisses vom realen Wert um rund eine Zehnerpotenz führen.
2. Die realen mittleren Verweilzeiten für die dargestellten Proben liegen wahrscheinlich zwischen den Fehlerbalken für das Exponentialmodell und den Kreuzen für das EPM. Deshalb können Angaben nur in einem sehr großen Intervall gegeben werden.
3. Für den Fall unbedeckter Grundwasserleiter sind folgende Abschätzungen zu treffen:

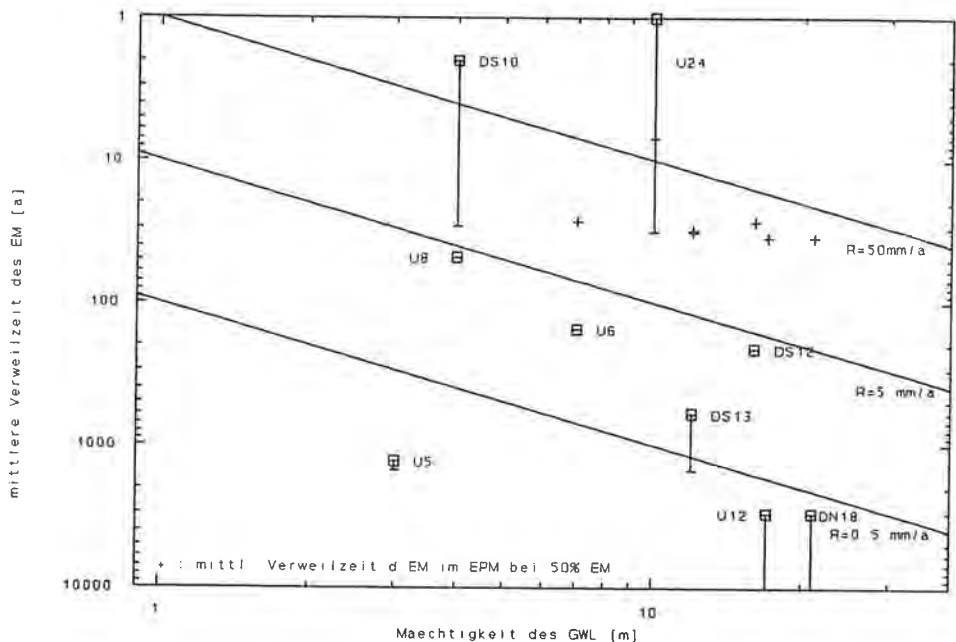


Fig. 39: Aus grundwassererfüllter Mächtigkeit und mittlerer Verweilzeit resultierende Neubildungsraten für 1988 beprobte Festgesteinsaufschlüsse. Porosität: 5 %; Inputfunktion: siehe 4.4.5. - 2; „+“: EPM mit 50 % Anteil des EM.
 Values of recharge resulting from saturated thickness and mean residence time for wells in hard rock, sampled in 1988. Porosity: 5 %; input function: refer 4.4.5. - 2; „+“: EPM with 50 % fraction of the EM.

- Für die Brunnen (Ulsit) U 5, U 12, (Deren) DN 8, DN 18 ist mit Neubildungsraten von < 1 mm/a zu rechnen.
 - Bis zu 5 mm/a sind bei (Ulsit) U 6, U 8, (Delgertsogt) DS 13 möglich.
 - Die zum Teil weit darüber liegenden Werte von bis zu über 50 mm/a für (Delgertsogt) DS 10, DS 12, (Ulsit) U 24 scheinen zunächst überhöht zu sein. Es ist jedoch zu bedenken, daß die Werte nicht die Verhältnisse der Region, sondern die der Aufschlußumgebung widerspiegeln und eine große Spannweite des Lösungsbereiches vorliegt.
4. Bringt man für die Brunnen (Ulsit) U 6, U 12, (Delgertsogt) DS 13, (Deren) DN 18 das Exponential-Piston-Flow-Modell in Ansatz, so resultieren Neubildungsraten von > 10 mm/a. Dabei wird ein gewisser nivellierender Effekt des Modells sichtbar.

Bemerkenswert ist der hohe Tritiumgehalt im Brunnen Delgertsogt 10, der sich innerhalb eines ausstreichenden Granitmassivs befindet.

b) Lockergesteinsbereich

Folgenden Brunnen wird der Lockergesteinstyp zugeordnet: (Deren) DN 3, DN 5, DN 6, DN 14, DN 15; (Delgertsogt) DS 17, DS 18, DS 20; (Ulsit) U 4, U 11, U 19, U 20, U 21, U 23.

Bei Verwendung eines Porositätswertes von rund 20 % ergibt sich im Mächtigkeits-Verweilzeit-Diagramm das in Fig. 40 dargestellte Bild. Danach kann ein-

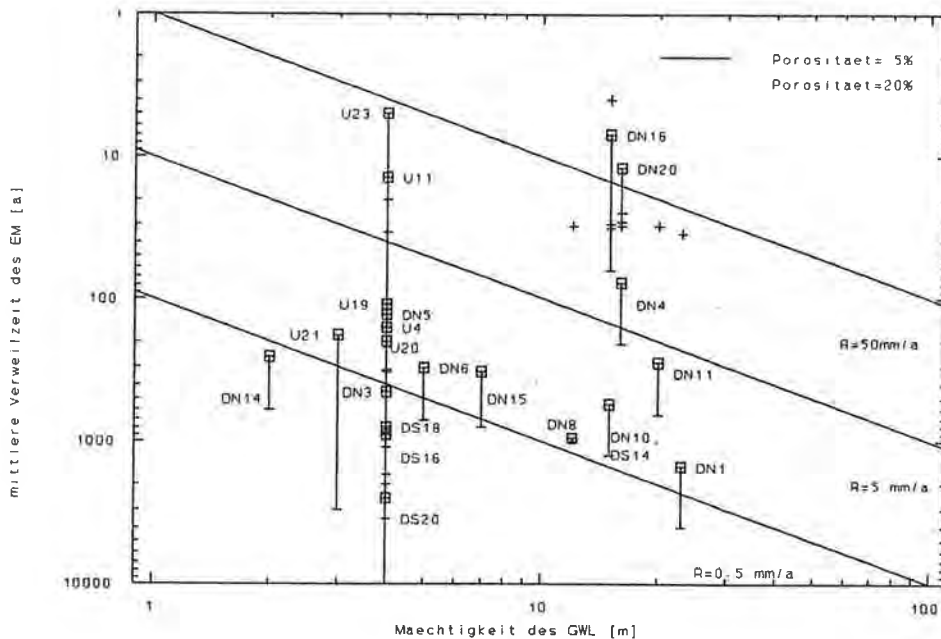


Fig. 40: Aus grundwassererfüllter Mächtigkeit und mittlerer Verweilzeit resultierende Neubildungsraten für 1988 beprobte Lockergesteinsaufschlüsse (Zuordnung zum Lockergestein z. T. unsicher). „+“: EPM mit 50 % Anteil des EM.
 Values of recharge resulting from saturated thickness and mean residence time for wells in loose rock, sampled in 1988 (belonging to loose rock partially uncertain). „+“: EPM with 50 % fraction of the EM.

geschätzt werden, daß nennenswerte Neubildungsraten grundsätzlich nur für die Aufschlüsse Deren 4, 5, 11, 16, 20, Ulsit 11, 19, 23 zu erwarten sind.

Jedoch gilt auch hier die bereits genannte starke Abhängigkeit des Datierungsergebnisses von der Modellwahl, die adäquat zu den hydrogeologischen Verhältnissen erfolgen muß. Die Kreuze in der Grafik zeigen eine möglicherweise 10fach höhere Neubildungsraten für den Fall des Zutreffens des Exponential-Piston-Flow-Modells bei einem EM-Anteil von 50 %.

Die hohen Tritiumwerte für Ulsit 23 und Deren 20 (83 bzw. 100 T.U.) scheinen in Verbindung mit der aus Tab. 18 hervorgehenden Lage in der Nähe ausstreichender Granitgebiete die Hypothese zu bestätigen, daß die bedeutendsten Neubildungsraten im Ausbiß von Festgesteinskörpern erreicht werden.

Aufgrund der exponierten Lage im $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ -Diagramm (Fig. 35) ist für die Brunnen Deren 16 und 20 in Verbindung mit dem Tritiumgehalt von 66,6 T.U. bzw. 100 T.U. anzunehmen, daß sehr gute Wasserwegsamkeiten zur Oberfläche bestehen, die wahrscheinlich auf einer Beziehung zum nahe ausstreichenden Festgesteinskörper beruhen.

4.4.5.2. Auswertung der Tritiumdaten für die 1990 beprobten Aufschlüsse

Die Tritiummeßwerte der zweiten Probenahmeserie in drei weiteren Teiluntersuchungsgebieten ergeben gemeinsam mit den betrachteten Inputfunktionen das in Fig. 41 dargestellte Bild.

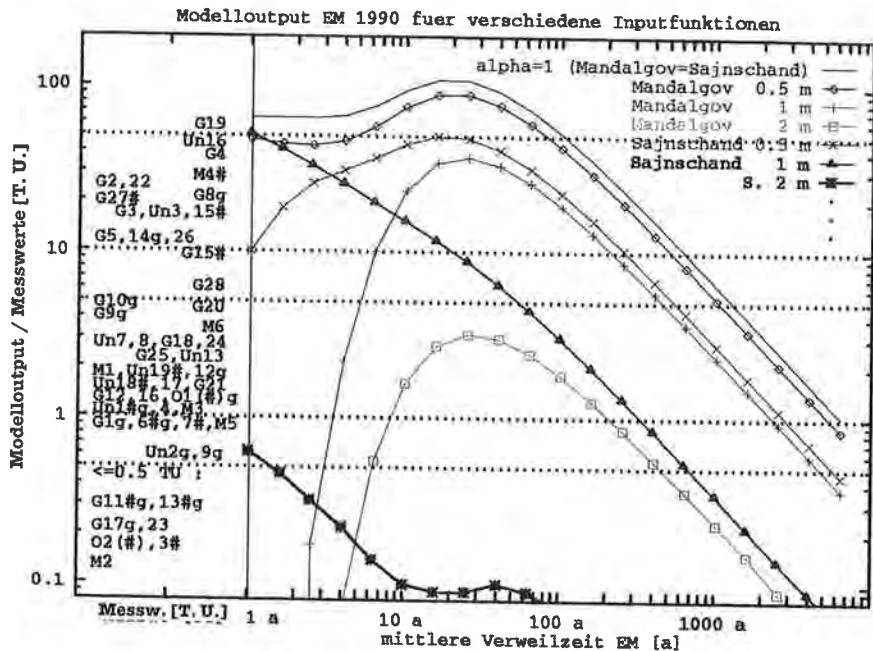


Fig. 41: Modelloutput für das EM 1990 bei verschiedenen Inputfunktionen; links Meßwerte der Aufschlüsse, dabei bedeuten „g“ gespannt, „#“ Festgestein; „M“ Mandalgov, „Un“ Undershill, „G“ Gurvansaihan.
 Model output for the EM in 1990 for several input functions. left: measured values of the wells with „g” – confined ground water, „#” – well in hard rock, „M” – Mandalgov, „Un” – Undershill, „G” – Gurvansaihan.

Im Unterschied zu den vorangehend besprochenen Proben liegen für die Gebiete Gurvansaihan, Mandalgov/Olgoingobi und Undershill Informationen zu Ausdehnung und Entfernung des Neubildungsgebietes für die einzelnen Brunnen vor (Tab. 17). Diese berechtigen zum Einsatz des Exponential-Piston-Flow-Modells unter Verwendung resultierender Anteile des Exponentialmodells.

a) Festgesteinsbereich

Für die Aufschlüsse (Gurvansaihan) G 11, G 13 und (Olgoingobi) O 3 lassen die niedrigen Tritiumkonzentration keine quantitative Aussage über die Grundwasserneubildung zu. Da es sich um gespannte Grundwässer handelt, sind schlechte Neubildungsbedingungen im Speisungsgebiet jedoch nicht von vornherein als sicher anzunehmen.

Die Aufschlüsse (Gurvansaihan) G 6, G 14, (Undershill) Un 1, Un 16 und Un 15 kennzeichnen offenbar relativ hohe Neubildungsraten von > 5 mm/a, während die anderen Brunnen sehr wahrscheinlich schlechteren Bedingungen für die Neubildung unterliegen. Es ist allerdings zu bedenken, daß die Werte für die grundwassererfüllte Mächtigkeit den Angaben für den jeweiligen Brunnen entsprechen. Hier gehen die betreffenden Brunnen lediglich mit 1–2 m in die Berechnung ein. Bei größeren Mächtigkeiten, die nicht unwahrscheinlich sind, rücken diese Brunnen im Diagramm nach rechts und somit in den Bereich der anderen Brunnen und höherer Neubildungsraten (Fig. 42).

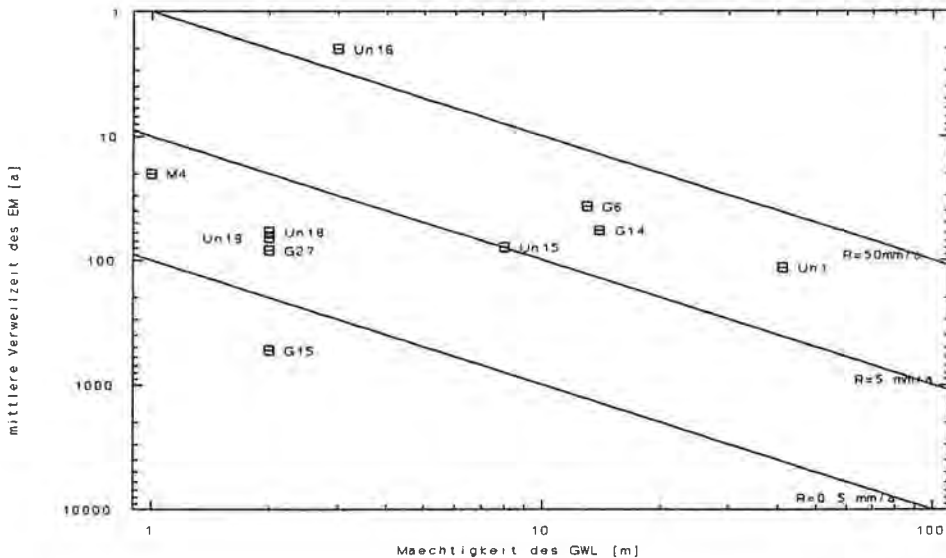


Fig. 42: Aus grundwassererfüllter Mächtigkeit und mittlerer Verweilzeit resultierende Neubildungsraten für 1990 beprobte Aufschlüsse aus dem Festgesteinsbereich (bei Porosität = 5 %). Recharge rates resulting from saturated thickness and mean residence time for wells in hard rock, sampled in 1990 (porosity = 5 %).

b) Lockergesteinsbereich

Bei der Interpretation der Ergebnisse (Fig. 43) fällt zunächst auf, daß für viele Meßwerte ein großer Lösungsbereich resultiert, der nur vage Zuordnungen zu Neubildungsraten zuläßt.

Die Ursache dieses Phänomens ist die eingangs erwähnte simultane Verwendung zweier Inputfunktionen. Die Inputfunktion für eine 1 m mächtige Aerationzone führt meist zu einer bedeutend geringeren mittleren Verweilzeit für den Exponential-Modell-Teil als die Inputfunktion für 0,5 m. Dies veranschaulicht einmal mehr die Notwendigkeit einer guten Kenntnis der Gebietsverhältnisse. Weiterhin ist zu bemerken, daß scheinbar recht hohe Neubildungsraten resultieren, wenn man von Lockergesteinsporositäten ausgeht, wie sie den in Tab. 14 gegebenen Gesteinsansprachen entsprechen. Bei der Verwendung von Porositätswerten zur Abschätzung der Neubildungsraten kann jedoch nicht außer acht gelassen werden, daß die Neubildung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf ein Festgesteinsgebiet zurückgeht, abgesehen von einer möglicherweise unexakten Ansprache des Bohrgutes. Daher wird auch hier a priori von einem Wert von 5 % ausgegangen. Für das Gros der Aufschlüsse liegt die Neubildungsrate zwischen 5 mm/a und 10 mm/a.

Bei den im Diagramm weit darüber liegenden Tiefbrunnen Olgoingobi 1 und 2 offenbart sich eine Grenze des hier verwandten Konzeptes: Die Stellung dieser Proben resultiert hauptsächlich aus der Addition der Teilmächtigkeiten der im Brunnen aufgeschlossenen Aquiferbereiche zur grundwassererfüllten Mächtigkeit insgesamt. Diese Aufschlüsse sind in mehreren sehr unterschiedlichen Teufenintervallen verfiltert.

Der Tritiumgehalt spiegelt also ein Mischwasser aus mehreren Komponenten wider, von denen jede aus unterschiedlichen Neubildungsbedingungen resultieren

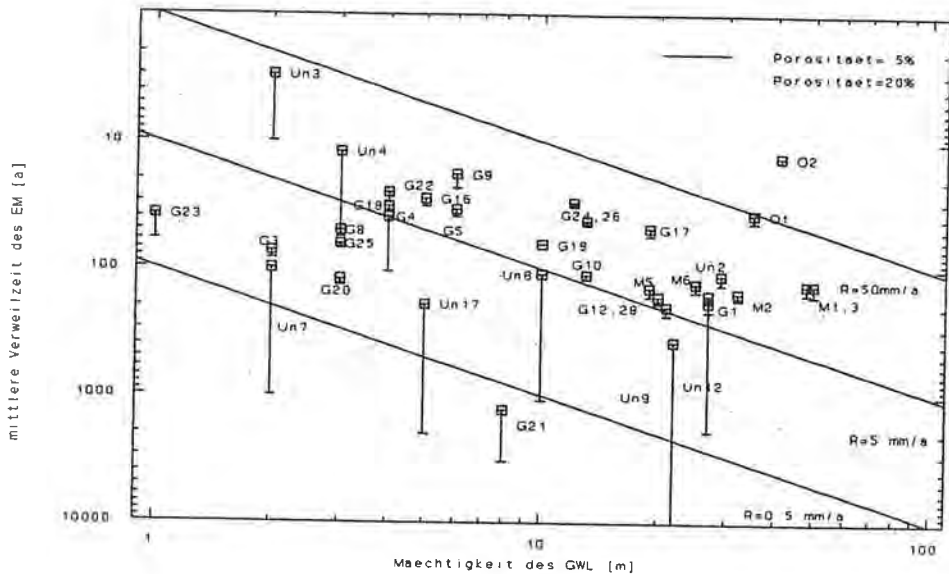


Fig. 43: Aus grundwassererfüllter Mächtigkeit und mittlerer Verweilzeit resultierende Neubildungsraten für 1990 beprobte Aufschlüsse aus dem Lockergesteinsbereich.
 Values of recharge resulting from saturated thickness and mean residence time for wells in loose rock, sampled in 1990.

kann. Für Fälle wie diese ist es zumindest erforderlich, den Filterbereich des Hauptzustromes an zufließendem Wasser zu ermitteln und ein potentielles Neubildungsgebiet zuzuordnen.

Bei der Bewertung aller Zahlen für die abgeschätzte Grundwasserneubildung ist zu beachten, daß diese Zahlen nur für das Neubildungsgebiet relevant sein können!

4.4.6. Diskussion der Radiokohlenstoffmeßwerte

Ein Vorteil der Anwendung der Radiokohlenstoffmethode liegt im großen Datierungsbereich, insbesondere für relativ alte Wässer. Von der Evaluierung der Wechselwirkungen des Grundwassers mit der Matrix des Grundwasserleiters abgesehen, stellt insbesondere die Bestimmung des ^{14}C -Anfangsgehaltes ein wesentliches Problem bei der Bewertung entsprechender Meßwerte dar.

Es wurden verschiedene Verfahren zur Bestimmung des Anfangsgehaltes entwickelt (zusammengefaßt in: C. FONTES & J.-M. GARNIER, 1979), die als Eingangsparameter Größen verwenden, die im vorliegenden Fall nicht verfügbar sind. Dazu zählen z. B. ^{14}C -Gehalt des CO_2 der Bodenluft und des Bodenkarbonats, Konzentrationen des CO_2 im Grundwasser, $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des gasförmigen CO_2 und des Bodenkarbonates.

Bei der Abschätzung des Anfangsgehaltes und Auswertung des ^{14}C -Gehaltes der Grundwässer ist unter Berücksichtigung der dem Autor verfügbaren Informationen von folgenden Prämissen auszugehen:

1. Als Näherung kann angenommen werden, daß das Wasser flacher Brunnen, soweit diese aus dem umgebenden unbedeckten Grundwasserleiter fördern, den ^{14}C -

Anfangsgehalt haben. Falls klare Vorstellungen über das hydrogeologische Modell bestehen, ist eine Bestimmung des Anfangsgehaltes denkbar, indem aus der Tritiumauswertung bekannte Modellparameter für die Anpassung des ^{14}C -Anfangsgehaltes im selben Modell verwendet werden.

Dieses empirische Konzept wurde im Prinzip bereits in H. MOSER & W. RAUERT (1980) dargestellt. Aus Sicht des Autors ist die vielfach geübte Praxis, für die Datierung ein und desselben Grundwassers nach ^{14}C -Werten ein anderes Modell zu verwenden als für die Auswertung von Daten anderer Tracer, in vielen Fällen kritisch zu bewerten.

Dabei wird die Inputfunktion jeweils als zeitliche Entwicklung des Tracereintrages an der Grundwasseroberfläche verstanden.

Wendet man dieses Verfahren schematisch auf die gemessenen ^{14}C -Werte an, erhält man folgende Anfangsgehalte aus den einzelnen Proben:

- für die 1988 beprobten Aufschlüsse mit dem Exponentialmodell: DN 1: 85 pmc, DN 8, DN 10: 52 pmc, DN 15, DN 16, DN 20: 75 pmc, DN 13: 60 pmc;
- für die 1990 beprobten Aufschlüsse mit dem Exponential-Piston-Flow-Modell und den in Tab. 17 aufgelisteten Anteilen für das Exponentialmodell: Un 13: 78 pmc, E 2: 75 pmc, G 2: 90 pmc, G 28: 78 pmc.

Für die Proben DS 14, U 24, M 1, M 2, G 1 ist keine Anpassung möglich; eine wahrscheinliche Ursache wird im Punkt 3. aufgezeigt.

Die nach diesem Verfahren gewonnenen relativ niedrigen Anfangsgehalte stehen z. T. im Widerspruch zu dem im folgenden Punkt behandelten Aspekt.

2. Im gesamten Untersuchungsgebiet kann der Pflanzenbewuchs als recht karg eingeschätzt werden. Eine Anreicherung des CO_2 im Boden durch die Vegetation kann also nur in bescheidenem Maße stattfinden; entsprechend gering ist auch die Konzentration des organisch erzeugten Kohlendioxids. Dies wird durch die gemessenen $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalte (vgl. Tab. 15) belegt, die auf einen spärlichen Vegetationseinfluß hindeuten. Insbesondere gilt dies für Wässer, die durch die Versinkung in Klüfte des Festgesteins gebildet wurden. Wässer des nichtkarbonatischen Festgesteins sollten in der Regel an relativ niedrigen Hydrogenkarbonatgehalten und Gesamtmineralisationen erkennbar sein. Theoretisch ist zu erwarten, daß der ^{14}C -Gehalt des Grundwassers der Festgesteinsaufschlüsse relativ wenig verfälscht ist – natürlich unter der Voraussetzung, daß es sich nicht um karbonatische Gesteine handelt und kein geogenes CO_2 vorhanden ist.
3. Besondere Berücksichtigung müssen Wässer erfahren, die im Festgestein gebildet und aus Lockergestein gefördert werden, weil in diesen Fällen nicht nur mit einer Verfälschung des realen ^{14}C -Wertes (Anfangsgehalt vermindert durch radioaktive Umwandlung und verändert durch modellgemäße Vermischung verschieden alter Komponenten), sondern auch mit Diskrepanzen zwischen hydrochemischen und ^{14}C -Befunden zu rechnen ist. Das heißt, daß möglicherweise der ^{14}C -Gehalt durch die Neubildung im Festgesteinsbereich und die mittlere Verweilzeit bestimmt wird, während der Hydrogenkarbonatgehalt im wesentlichen durch das Fließen im Lockergesteinsgrundwasserleiter determiniert ist. Somit geht ein relativ hoher Hydrogenkarbonatgehalt mit niedrigen ^{14}C -Werten einher, die eine viel höhere als die reale mittlere Verweilzeit anzeigen.
Für diese Fälle ist nach Ansicht des Autors ohne detaillierte Informationen (die zur Zeit nicht vorliegen) selbst eine semi-quantitative Datierung auf Grundlage der ^{14}C -Werte unmöglich, da unterschiedliche ^{14}C -Anfangsgehalte einen massiven Einfluß auf das Datierungsergebnis nehmen.

Zur Verdeutlichung der Stärke dieses Einflusses werden die gemessenen Werte in Relation zu mittleren Verweilzeiten, die aus unterschiedlichen Anfangsgehalten resultieren, dargestellt (vgl. Fig. 44 und Fig. 45). Für die variable (!) ^{14}C -Inputfunktion wurden folgende ^{14}C -Werte im Luft-Kohlendioxid herangezogen:

- die von I. LEVIN et. al. (1985) für die nördliche Hemisphäre vorgeschlagene Reihe für „saubere Luft“,
- Daten nach I. LEVIN (1993) und T. T. TANS (1981).

Der Modelloutput wurde sowohl für das Exponentialmodell (vgl. Fig. 44) als auch für das Piston-Flow-Modell (vgl. Fig. 45) berechnet; beide können als Extremfälle des Exponential-Piston-Flow-Modells gesehen werden. Die Differenzen, die sich aus der Anwendung beider Modelle ergeben, veranschaulicht Fig. 46.

Daraus kann man u. a. ablesen, daß sich der Modelloutput und damit die Datierungsergebnisse für die beiden Modelle z. T. drastisch voneinander unterscheiden. Ursachen sind der variable ^{14}C -Input sowie die unterschiedlichen Wichtungsfunktionen beider Modelle.

Somit ist als Konsequenz abzuleiten, daß der allgemein verwendete Begriff des „ ^{14}C -Alters“ stets durch die Angabe des zugrunde gelegten Modelles konkretisiert werden sollte.

Man erkennt in Fig. 46 die Verweilzeitbereiche, innerhalb derer die Differenz im Output beider Modelle unterhalb 10 pmc liegt:

- für $C_0 = 50$ pmc: 40–15000 a,
- für $C_0 = 100$ pmc: 100–6000 a.

Das heißt, je niedriger der Anfangsgehalt ist, umso stärker wirkt sich die Verwendung eines falschen Modells aus. Die Größe dieser Auswirkung kann im Parameter mittlere Verweilzeit selbst bei einer Outputdifferenz von bis zu 10 pmc eine Zehnerpotenz betragen. In solchen Fällen wäre das Datierungsergebnis für Neubildungsabschätzungen nicht zu verwenden.

Es wird offensichtlich, daß einer richtigen Modellwahl neben der Bestimmung des ^{14}C -Anfangsgehaltes (welcher dominanten Einfluß auf das Datierungsergebnis hat) ein hoher Stellenwert einzuräumen ist.

Das Diagramm zeigt aber auch weiterhin, daß in einem Bereich von etwa 500–2500 a (mittlerer) Verweilzeit die sichersten Datierungsergebnisse zu erwarten sind.

Zur Identifikation der unter 3. beschriebenen Wässer können theoretisch zwei Merkmale herangezogen werden:

- a) Falls zuverlässige hydrochemische Werte vorliegen, könnte mit Hilfe thermodynamischer Ansätze (PHREEQE) abgeschätzt werden, welche mineralische und damit geologische Umgebung den Chemismus der Wässer geprägt hat, d. h., eine Unterscheidung zwischen Fest- und Lockergesteinsgrundwasserleiter und eventuell die Identifikation von Evaporationseinflüssen wären möglich.
- b) Wenn die betreffenden Wässer keine zu hohe reale mittlere Verweilzeit aufweisen, führen sie bei niedrigem ^{14}C -Gehalt Tritiumkonzentrationen, die über der Nachweisgrenze liegen. Betreffende Wässer soll das folgende Tritium- ^{14}C -Diagramm der entsprechend beprobten Grundwässer (Fig. 47) herausstellen.

Danach kommen die Proben (Olgoingobi) O 1, (Mandalgov) M 1, (Deren) DN 10, DN 8 und (Delgertsogt) DS 13, DS 14 mit hoher Wahrscheinlichkeit für die

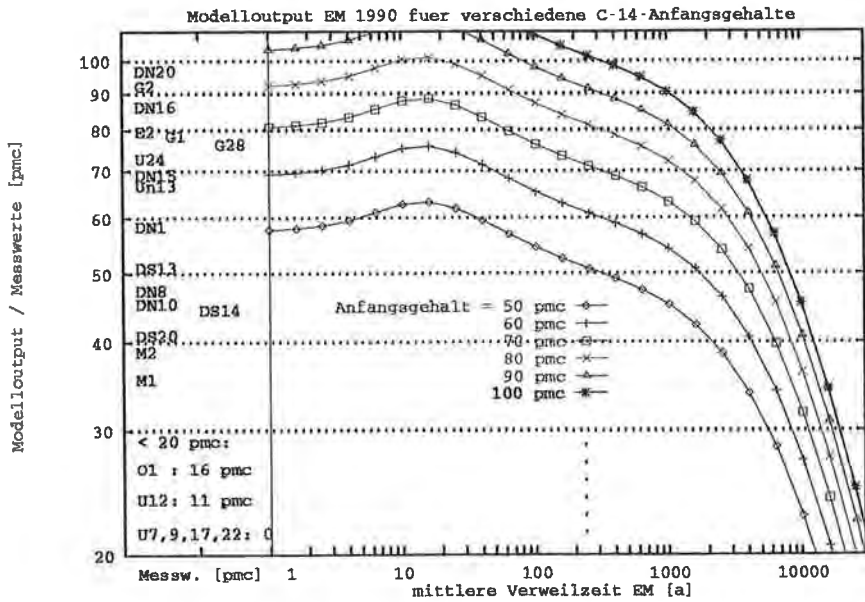


Fig. 44: Meßwerte [pmc] und Modelloutput für das Exponentialmodell bei verschiedenen ¹⁴C-Anfangsgehalten.
 Measured values [pmc] and model output for the exponential model for several ¹⁴C initial contents.

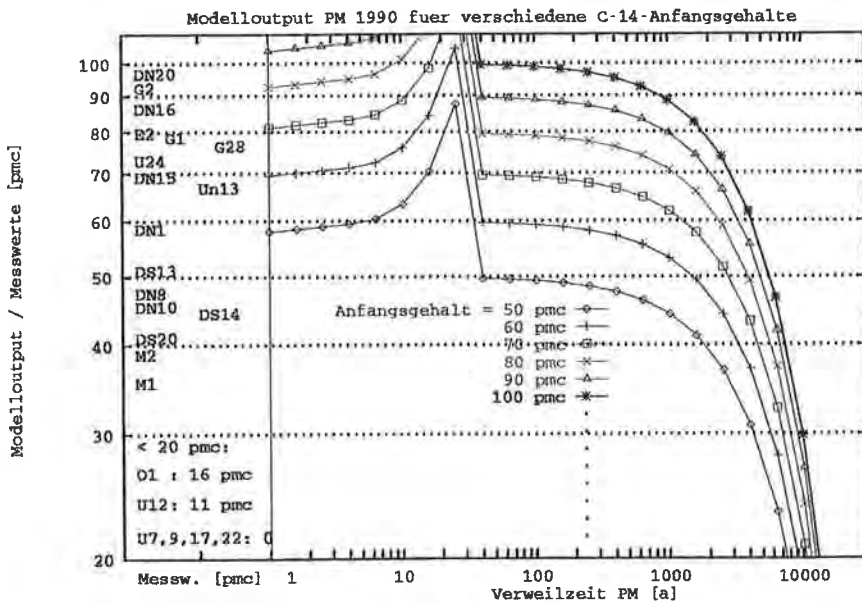


Fig. 45: Meßwerte [pmc] und Modelloutput für das Piston-Flow-Modell bei verschiedenen ¹⁴C-Anfangsgehalten.
 Measured values [pmc] and model output for the Piston-Flow-Modell for several ¹⁴C initial contents.

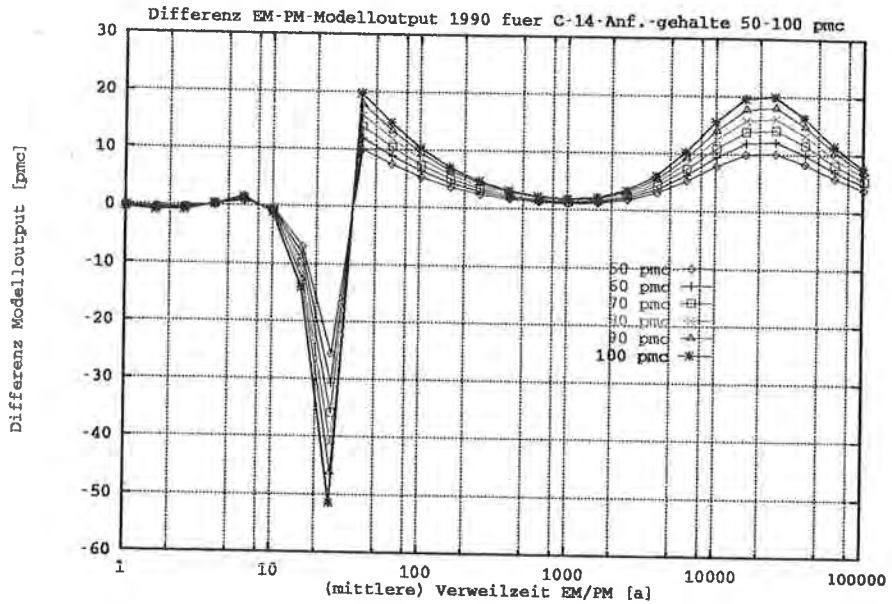


Fig. 46: Differenz zwischen dem Modelloutput des Exponential- und des Piston-Flow-Modells bei verschiedenen ^{14}C -Anfangsgehalten.
 Difference between model output of the exponential and of the piston flow model for different ^{14}C initial contents.

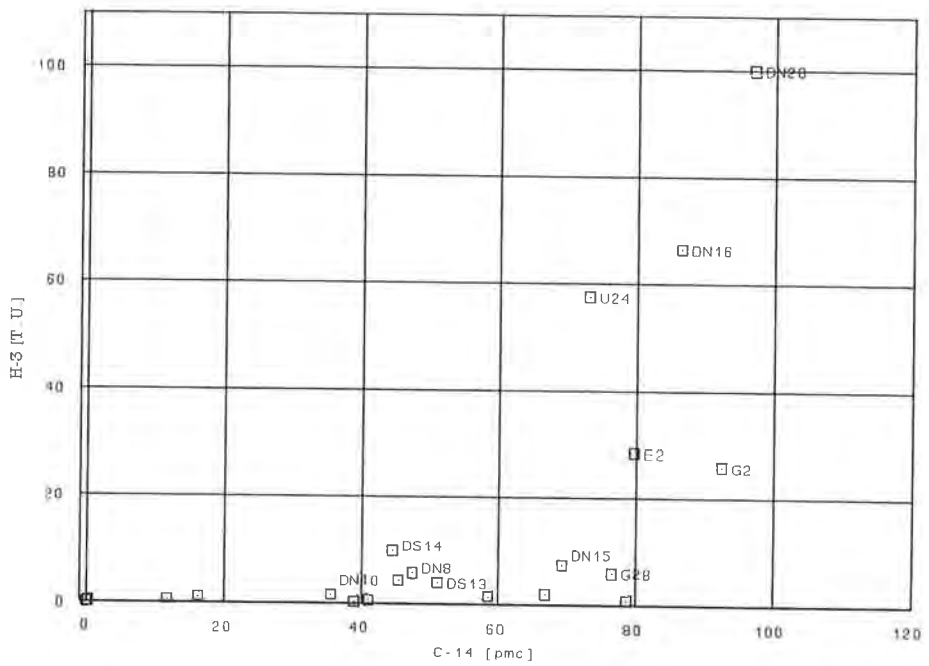


Fig. 47: ^{14}C - ^3H -Diagramm.
 ^{14}C - ^3H -diagramm.

diskutierte Kategorie von Wässern in Betracht. In Abhängigkeit vom ^{14}C -Anfangsgehalt ist dies eventuell auch für die Proben (Gurvansaihan) G 1, G 28, (Deren) DN 1, DN 15 und (Undershill) Un 13 anzunehmen.

4. Ein bisher quantitativ wenig untersuchter Effekt ist die Beeinflussung des ^{14}C -Gehaltes im Grundwasser durch Austauschprozesse mit atmosphärischem CO_2 in oberflächennahen Bereichen, wodurch sich die ^{14}C -Konzentration u. U. ohne Grundwasserneubildung erhöhen kann.
Dies dürfte jedoch nur für Grundwässer mit niedrigem Gesamtkohlenstoffgehalt von Bedeutung sein.

4.4.7. Zur Auswertung der hydrochemischen Daten

Eine detaillierte Auswertung der hydrogeochemischen Befunde (vgl. Abschnitt 4.2. sowie Tab. 16) für jeden einzelnen Aufschluß erscheint aus mehreren Gründen nicht sinnvoll. Zum einen fehlt es an ausreichend gesicherten Kenntnissen über die konkreten hydrogeologischen Verhältnisse an den einzelnen Aufschlüssen, zum anderen ist wegen der langen Zeit zwischen Probenahme und Analyse mit Unsicherheiten in der Größe der gemessenen Parameter zu rechnen.

Zur Auswertung derartiger Daten bieten sich statistische Methoden an, welche auch das Erkennen von Beziehungen zwischen isotopischen und hydrogeochemischen Größen unterstützen.

Bislang wurden in der Isotopenhydrogeologie arider Gebiete kaum multivariate Methoden eingesetzt. Diese bieten jedoch gegenüber herkömmlichen univariaten Verfahren auch unter den Bedingungen arider Gebiete entscheidende Vorteile.

4.4.7.1. Methodik

Grundlage für die statistischen Untersuchungen bilden die in Tab. 16 aufgelisteten Einzelmerkmale aus allen verfügbaren 95 Analysen. Die gewonnenen hydrochemischen Daten wurden zunächst mit Hilfe der Programme PHREEQE (D. L. PARKHURST et al., 1980), PHR-GEN und PSCAN/PN-SCAN (B. SPERLING & B. MERKEL, 1992) überprüft.

Der erforderliche Ladungsausgleich wurde mit Hilfe von Hydrogenkarbonat (für Anionen) und Calcium (für Kationen) realisiert. In der weiteren Bearbeitung wurden die so korrigierten Werte verwendet. Die berechneten Sättigungskoeffizienten für verschiedene Mineralphasen wurden ebenfalls bei der Interpretation mit herangezogen.

Die Merkmale $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ wurden im Merkmal Deuterium-Exzeß (D-Ex) zusammengefaßt; wegen der langen Zeit zwischen Probenahme und Analyse wird auf die Merkmale pH-Wert und CO_3^{2-} verzichtet. Zur Systematisierung des Datenmaterials stehen im wesentlichen vier unabhängige Merkmale zur Verfügung:

- Geohydraulisches Druckregime: gespannt – ungespannt.
- Tiefe der Grundwasserentnahme; für eine Zuordnung zu den Kategorien tief – flach wird die Gesamttiefe des Aufschlusses verwendet. Die für eine Zuordnung in diese beiden Kategorien verwendete Grenzteufe beträgt 10 m. Sie widerspiegelt den Wert, bei dem sich die Wässer in der Gesamtheit ihrer Merkmale statistisch am stärksten voneinander unterscheiden.
- Grundwasserlagerstättentyp: Festgestein – Lockergestein.
- Gesteinstyp: (sedimentogen) – (magmatogen/metamorph).

Bei der letztgenannten Unterscheidung ist die scharfe Trennung mit einigen Unsicherheiten behaftet, da eine offenbar tiefreichende physikalische Verwitterung anstehendes kristallines Material an der Oberfläche stark beeinflusst und zu Zersatz führt.

Bei der Verwendung dieser unabhängigen Merkmale muß in Kauf genommen werden, daß einige Proben Mischwässer aus Horizonten unterschiedlicher Gruppenzugehörigkeit repräsentieren (z. B. DN 8, DS 12, DS 13).

Neben Einflüssen, die im konkreten Fall nicht zahlenmäßig erfaßbar sind (z. B. chemische Beschaffenheit und hydraulische Parameter des Grundwasserleiters, Länge des Fließweges), sind die genannten vier unabhängigen Merkmale a priori unmittelbar oder mittelbar an der Ausbildung der isotopischen und hydrochemischen Signatur der Grundwässer beteiligt. Da sowohl die isotopische und chemische Zusammensetzung der Wässer als auch die Wirkung von verschiedenen Einflüssen komplexer Natur sind, müssen zur Untersuchung multivariate Methoden herangezogen werden.

Zur Bearbeitung allgemein interessierender Problemstellungen wurde ein Algorithmus verwendet, mit dessen Hilfe nicht nur singuläre Zusammenhänge zwischen einzelnen gemessenen Parametern, sondern signifikante Beziehungen unter Berücksichtigung mehrerer Größen aufgedeckt werden können.

Die Untersuchungen wurden in folgende Etappen gegliedert:

Frage/Problem	Verfahren
Welche erfaßbaren unabhängigen Merkmale üben selbständig oder im Zusammenwirken mit anderen einen signifikanten Einfluß auf die Ausprägung der chemischen und isotopischen Signatur der Grundwässer aus?	multipler F-Test
Welche Einteilung von Probengruppen ist daher sinnvoll? ↓	
Sind diese Einteilungen zutreffend bzw. reproduzierbar? Welche Merkmale trennen diese Gruppen am stärksten? ↓	Diskriminanzanalyse
Welche Merkmale unterliegen überwiegend gemeinsamen Einflüssen? Welche der erfaßbaren Einflüsse steuern maßgebend die Ausbildung der isotopischen und hydrochemischen Signatur der Grundwässer?	Faktorenanalyse

Besonderheiten der genannten Methoden können an dieser Stelle nur kurz umrissen werden; für eine eingehendere Beschreibung sei auf die einschlägige Spezialliteratur verwiesen (vgl. z. B. K. BACKHAUS et al., 1990, M. NORUŠIS, 1990).

Multipler F-Test: Bei der Untersuchung des Einflusses der unabhängigen Merkmale ist sowohl die Wirkung jedes einzelnen Effektes als auch der gleichzeitige Einfluß mehrerer Faktoren auf die Gesamtheit der gemessenen abhängigen Merkmale in Betracht zu ziehen.

Entsprechend den jeweils herangezogenen unabhängigen Merkmalen resultieren Gruppen von Proben, deren Unterscheidung voneinander es zu prüfen gilt. Zur Prüfung der Hypothese der Gleichheit der Gruppen wurden verschiedene statistische Tests (nach M. NORUŠIS, 1990, S. B-84ff.) durchgeführt. Ergebnis der Tests ist eine Irrtumswahrscheinlichkeit für die Ablehnung der Hypothese der Gleichheit der Gruppen.

Diskriminanzanalyse: Ziel dieses Verfahrens ist eine maximale Trennung und Abgrenzung von Objekten in einzelne Gruppen, um eine zweckmäßige und begründbare Systematisierung zu finden. Grundlage der Trennung ist eine Diskriminanzfunktion, mit deren Hilfe sich ein Grenzwert bestimmen läßt, für den die Wahrscheinlichkeit, daß ein neues Element der falschen Gruppe zugeordnet wird, minimal ist. Die Reihenfolge in der Größe der Korrelationskoeffizienten einzelner Merkmalsgrößen mit der Diskriminanzfunktion gibt Auskunft über die Bedeutung der Merkmale bei der Trennung der Probengruppen.

Ein Maß für die Güte der Trennung ist, wieviel Prozent der betrachteten Objekte mittels der Diskriminanzfunktion korrekt ihrer tatsächlichen Gruppe zugeordnet werden können.

Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse können gegebenenfalls durch weitere Arbeitsschritte überprüft werden. Beispielsweise könnten dafür Diskriminanzanalysen unabhängig voneinander in jeweils zwei willkürlich gewählten Teilmengen der Gesamtstichprobe durchgeführt und die Ergebnisse anschließend verglichen werden.

Faktorenanalyse: Mit ihrer Hilfe sollen aus den gemessenen Merkmalen nicht direkt meßbare Größen abgeleitet und Variable zusammengefaßt werden, ohne den Informationsgehalt der Datenmenge zu vermindern. Im vorliegenden Fall soll das Verfahren teils zu explorativen Zielen (Ursachenfindung), teils zu konfirmatorischen Zwecken (Bestätigung von Hypothesen) eingesetzt werden.

Die gefundenen Faktoren sollen Aussagen über kausale Zusammenhänge ermöglichen. Daher wurde als Verfahren die klassische Faktorenanalyse in Anlehnung an die Empfehlungen von K. BACKHAUS et al. (1990) angewandt, d. h., daß z. B. nur Faktoren mit Eigenwerten > 1 extrahiert und Faktorenladungen $\geq 0,50$ interpretiert wurden.

Unter den konkreten Bedingungen des Untersuchungsgebietes muß neben den allgemeinen Prozessen, die die Grundwasserbeschaffenheit bestimmen, u. a. mit folgenden spezifischen Einflüssen auf die chemische und isotopische Signatur der Grundwässer gerechnet werden:

- anthropogen: Viehhaltung in der Nähe von Aufschlüssen (NO_3^- als Indikator),
- evaporativ: a) direkter Einfluß der Verdunstung entweder während des Fallens der Niederschläge oder durch Verdunstung aus der gesättigten Zone,
b) möglicher Einfluß einer Front aus Evaporationsresiduen, die für eine chemische Aufhärtung von Wässern verantwortlich sind, die tatsächlich bis zur Grundwasseroberfläche vordringen und zur Neubildung beitragen.

Aufbauend auf den Erfahrungen von H. HÖTZL et. al. (1982) – vgl. ebenda, S. 149 – bei der Untersuchung hydrochemischer Daten wurde die Faktorenanalyse in den Analysengruppen durchgeführt, die in den vorangegangenen Arbeitsschritten gefunden wurden. Damit sollen differenziertere Aussagen gewonnen werden, als sie bei Betrachtung des Gesamtmaterials möglich sind.

Ein großer Vorteil der Anwendung der Faktorenanalyse auf einen Datensatz, der sowohl isotopische als auch hydrochemische Merkmale enthält, ist u. a. darin zu sehen, daß einige isotopische Merkmale mehr oder weniger direkt natürlichen Einflüssen zugeordnet werden können. So steht beispielsweise der Tritiumgehalt mit der mittleren Verweilzeit im Grundwasserleiter und der Deuterium-Exzeß mit der

Verdunstungsbeeinflussung im Zusammenhang. Aus der gemeinsamen Anordnung von isotopischen und hydrochemischen Merkmalen mit jeweils hohen Faktorenladungen in gleichen Gruppen in varimax-rotierten Faktormustern können Anhaltspunkte über wesensbestimmende Einflüsse auf den Grundwasserchemismus gewonnen werden.

4.4.7.2. Ergebnisse

Die Durchführung des multiplen Tests auf Gleichheit der Analysengruppen ergab, daß sich die Analysengruppen bei Trennung nach dem Merkmal des Spannungszustandes (freies oder gespanntes Grundwasser) nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Dagegen führen die anderen Einflüsse (Tiefe, Fest-/Lockergestein, sedimentogen/nicht sedimentogen) zu einer signifikanten Unterscheidung der resultierenden Analysengruppen.

Die Resultate der durchgeführten Diskriminanzanalysen zeigt Tab. 6.

Tab. 6: Ausgewählte Ergebnisse von Diskriminanzanalysen unter Berücksichtigung verschiedener gruppierender Merkmale.
Some results of discriminant analysis, considering several grouping features.

Effekt (unabhängige Merkmale)	Anteil der korrekt zur realen Gruppe zugewiesenen Analysen [%]	Anzahl von Elementen in den Gruppen
flach/tief	74,7	42/53
sedimentogen/(magmatogen/metamorph)	69,5	66/29
Festgestein/Lockergestein	71,6	55/40

In Tab. 7 sind die einzelnen Merkmale in der Reihenfolge ihrer Korrelation mit der Diskriminanzfunktion für die Unterscheidung der Wässer aus tiefen bzw. flachen Aufschlüssen aufgeführt. Komponenten, die sich signifikant in beiden Analysengruppen unterscheiden, sind dabei mit „*“ gekennzeichnet. (Hierbei wird stets Bezug auf das 95 % Niveau genommen.)

Tab. 7: Trennende Merkmale zwischen Wässern aus flachen bzw. tiefen Aufschlüssen. „*“ – signifikante Unterschiede; „+“ – höhere Werte; „-“ – niedrigere Werte.
Discriminating features for waters from shallow and deep wells. „*“ – significant differences; „+“ – higher values; „-“ – lower values.

		flach	tief
NO ₃ ⁻	*	+	-
SI-Calcit	*	+	-
SI-Aragonit	*	+	-
SI-Dolomit	*	+	-
³ H	*	+	-
HCO ₃ ⁻	(*)	+	-
CL ⁻		-	+
K ⁺		-	+
Na ⁺		-	+
LF		-	+

Erwartungsgemäß wirken Tritium und Nitrat, welche Indikatoren für relativ junge Grundwässer bzw. für anthropogene Einflüsse darstellen, stark trennend zwischen beiden Probengruppen.

Für die erhöhten Sättigungsindexe (SI-) von Calcit, Aragonit und Dolomit kommen zwei Ursachen in Betracht:

- a) Flache Grundwässer werden mehr als tiefe Grundwässer von der Wechselwirkung mit Rückständen evaporativer Anreicherung beeinflusst, wohingegen tiefere Wässer zunehmend besser im Gleichgewicht stehen.
- b) In (sehr) flachen Grundwässern kann es zur direkten Verdunstung von Grundwasser kommen.

Die in tieferen Wässern durchschnittlich höheren Werte für Natrium bzw. die Leitfähigkeit (LF) sind wahrscheinlich auf Ionenaustausch bzw. die Zunahme der Gesamtmineralisation durch Wechselwirkung mit der Gesteinsmatrix zurückzuführen.

Beachtung verdient die Tatsache, daß sich flache und tiefe Wässer nicht signifikant hinsichtlich des Deuterium-Exzesses (H2EX) unterscheiden. Dies ist wahrscheinlich auf den nicht sehr tiefreichenden Einfluß der Verdunstung zurückzuführen, sodaß dieser bei einer Teufe von 10 m durch Mischungsprozesse bereits verwischt ist.

Weiterhin spielt sicher eine Rolle, daß unterschiedlich schnell infiltrierte Wässer in der Gruppe der flachen Aufschlüsse erfaßt werden.

Keine signifikante Unterscheidung besteht außerdem in den Merkmalen Calcium, Magnesium, SI-Gips, SI-Anhydrit, SI-Chalcedon, SI-Quartz, Sulfat und SiO_2 .

Als wesentliches Ergebnis der Faktorenanalyse ist in Tab. 8 die varimax-rotierte Faktorenmatrix für die Wässer aus flachen Aufschlüssen dargestellt.

Der bestimmende **Faktor 1** mit hohen Ladungen für Calcium, Magnesium, Sulfat und Kalium spiegelt wahrscheinlich mehrere Prozesse wider. Eine Einflußkomponente ist mit der Lösung von Erdalkali-Sulfat (untergeordnet -Karbonat) zu erklären.

Auf die Frage der Herkunft der gelösten Ionen wird in einem der folgenden Abschnitte näher eingegangen. Es ist jedoch damit zu rechnen, daß neben der Lösung aus dem Muttergestein eine Erhöhung der Mineralisation der Wässer beim Durchgang durch eine Front aus Evaporationsrückständen stattfindet.

Die gleichzeitig hohe Faktorenladung von Kalium in diesem Faktor kann auf die Verwitterung von Kalifeldspäten hindeuten.

Im **zweiten Faktor** treten der Deuterium-Exzeß, Natrium, Chlorid und Hydrogenkarbonat gemeinsam mit hohen Ladungen auf. Eine Erklärung für diese Konstellation ist in der verdunstungsbedingten Abnahme des Deuterium-Exzesses in oberflächennahen Bereichen und einer damit einhergehenden Anreicherung von Natrium und Chlorid zu sehen. Im Zuge dieses Prozesses mineralisieren wahrscheinlich bevorzugt Sulfate, während Karbonate länger in Lösung bleiben. Dafür sprechen sowohl das Fehlen einer hohen Faktorenladung von Sulfat in diesem Faktor, als auch die sulfatbetonte Zusammensetzung von Evaporationsrückständen in einer Bodenprobe (vgl. Tab. 16).

Im **dritten Faktor** besitzt nur das Nitrat eine hohe Faktorenladung. Dieser Faktor ist als anthropogener Einfluß zu interpretieren, der in Verbindung mit der Viehhaltung in der unmittelbaren Umgebung vieler Brunnen steht.

Tab. 8: Varimax-rotierte Faktorenmuster für Wässer aus flachen Aufschlüssen mit 34 % Restvarianz (VA – Varianzanteil).
 Varimax rotated factor patterns for waters from shallow wells with 34 % residual variance (VA – percent of variance).

Faktor VA	1 43 %	2 13 %	3 10 %
Mg ²⁺ SO ₄ ²⁻ Ca ²⁺ K ⁺	0,87 0,82 0,81 0,67		
Na ⁺ Cl ⁻ H ₂ EX HCO ₃ ⁻ ³ H		0,85 0,75 -0,62 0,55	
NO ₃ ⁻			0,97

Die Ergebnisse der Faktorenanalyse für 53 Proben aus tieferen Aufschlüssen zeigt Tab. 9.

Tab. 9: Varimax-rotierte Faktorenmuster für Wässer aus tiefen Aufschlüssen mit 29 % Restvarianz (VA – Varianzanteil).
 Varimax rotated factor patterns for waters from shallow wells with 29 % residual variance (VA – percent of variance).

Faktor VA	1 50 %	2 13 %	3 9 %
SO ₄ ²⁻ Mg ²⁺ Ca ²⁺ Na ⁺	0,94 0,94 0,86 0,71		
HCO ₃ ⁻ K ⁺		(0,42) 0,83 0,69	0,56
Cl ⁻ H ₂ EX ³ H			0,73 -0,71

Wahrscheinlich handelt es sich beim **ersten Faktor** um einen Mischfaktor. Hier sind mit Ausnahme des Natriums die gleichen Komponenten mit hohen Faktorenladungen gruppiert wie im ersten Faktor der flachen Wässer.

Daraus kann geschlossen werden, daß auch der Chemismus der tiefen Wässer in wesentlichem Maße während der Passage der oberflächennahen Bereiche geprägt

wird – zumindest, was die Erdalkalien und das Sulfat angeht. Diese Hypothese wird u. a. durch die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse (vgl. Tab. 7) gestützt, wonach für diese Komponenten keine signifikanten Unterschiede zwischen tiefen und flachen Wässern bestehen.

Gegenüber dem ersten Faktor im Faktorenmuster für flache Wässer ist hier das Kalium gegen Natrium ausgetauscht. Eine mögliche Erklärung besteht darin, daß das Kalium aus den Verwitterungslösungen im Zuge des Ionenaustausches wieder in Mineralgitter eingebaut wird – und zwar gegenüber dem Natrium in bevorzugtem Maße.

Das gemeinsame Auftreten von Kalium, (Natrium) und Hydrogencarbonat im **zweiten Faktor** kann als Einfluß des Ionenaustausches gedeutet werden. Dies ist auch eine Erklärung für den höheren durchschnittlichen Gehalt an Natrium in den tiefen Wässern.

Der **dritte Faktor** mit lediglich 9 % Anteil an der Gesamtvarianz enthält im wesentlichen die gleichen Komponenten wie der Faktor 2 der flachen Wässer. Er kann somit zum einen als „ererbte“ Kennzeichnung aus oberflächennahen Bereichen, die durch Mischung mit Tiefenwässern abgeschwächt wurde, verstanden werden. Zum anderen wäre für die Kombination von Natrium und Chlorid auch ein salinärer Tiefenwasseranteil denkbar.

Die Behandlung von Wässern aus sedimentogenen bzw. nichtsedimentogenen Grundwasserleitern ist nicht unproblematisch, da das im Aufschluß anstehende Gestein keineswegs mit dem Gestein im Speisungsgebiet identisch sein muß, obwohl dort die Beschaffenheit des Grundwassers in entscheidendem Maße geprägt werden kann.

Eine detailliertere Untergliederung in Gesteinstypen ist auf der Grundlage der mit Unsicherheiten behafteten Gesteinsansprachen nicht möglich (vgl. Tab. 14). In diesem Kontext sind die folgenden Ergebnisse zu sehen.

Die Reihenfolge der gemessenen Parameter entsprechend ihrer Korrelation mit der Diskriminanzfunktion zeigt Tab. 10. Naturgemäß weisen die Wässer sedimento-

Tab. 10: Unterscheidungsmerkmale zwischen Wässern aus sedimentogenen und nichtsedimentogenen Aquiferen. „“ – signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen; „+“ – höhere Werte; „-“ – niedrigere Werte.
Distinguishing features between waters from sedimentogenic and non-sedimentogenic aquifers. „*“ – significant differences between groups; „+“ – higher values; „-“ – lower values.*

		sedim.	magmat./met.
Cl ⁻	*	+	-
H2EX	*	-	+
Na ⁺	*	+	-
LF	*	+	-
SI-Aragonit		+	-
SI-Calcit		+	-
SI-Dolomit		+	-
HCO ₃ ⁻	*	+	-
SO ₄ ²⁻	*	+	-
SI-Quarz		-	+
SI-Chalcedon		-	+

gener Aquifere allgemein eine höhere Gesamtmineralisation auf. Dies drückt sich auch in den durchschnittlichen Konzentrationen der Einzelionen aus, wobei die Unterschiede beim Chlorid und Natrium am deutlichsten sind.

Bemerkenswert erscheint die große Bedeutung des Deuterium-Exzesses für die Unterscheidung beider Probengruppen.

Bei der Beurteilung dieses Phänomens ist zu berücksichtigen, daß alle 29 Aufschlüsse, die der Gruppe der nichtsedimentogenen Grundwasserleiter zugeordnet wurden (vgl. Tab. 6), ausschließlich zum Festgestein gehören (vgl. Tab. 14), während von den 66 Aufschlüssen sedimentogener Grundwasserleiter 40 Aufschlüsse zum Lockergesteinsbereich gerechnet werden. Es ist daher naheliegend, daß die Wässer der magmatogenen bzw. metamorphen Aquifere schneller von der Geländeoberfläche zum Grundwasserspiegel und zu tieferen Bereichen gelangt sind.

Vergleicht man die beiden Faktorenmuster für beide Analysengruppen (Tab. 11), so fällt auf, daß bei beiden im **ersten Faktor** Magnesium, Sulfat und Natrium hohe Ladungen aufweisen. Das Hinzutreten von Kalium für die magmatogenen bzw. metamorphen Gesteine zu diesem Faktor ist möglicherweise mit einem höheren Kaliumangebot in den feldspathaltigen Ausgangsgesteinen (z. B. Granite) zu erklären. Somit können im Zuge der Feldspatverwitterung im Grundwasser dieser Gesteine etwas höhere Kaliumkonzentrationen entstehen.

In den sedimentogenen Aquifere, von denen ein großer Teil zum Lockergesteinsbereich gehört, sind die an diesem Prozeß beteiligten Edukte intensiver verwittert und daher kaliumärmer.

Die prinzipielle Ähnlichkeit dieses dominierenden Faktors (41 % bzw. 51 % Anteil an der Gesamtvarianz) kann wie folgt erklärt werden:

Grundsätzlich wird in beiden Gesteinsgruppen der Chemismus durch den gleichen Prozeß determiniert, wofür hauptsächlich die Evaporation in Frage kommt. Hierfür sprechen auch die absoluten Durchschnittswerte der Konzentrationen der Haupt-

Tab. 11: Varimax-rotierte Faktorenmuster für Wässer aus sedimentogenen bzw. magmatogenen und metamorphen Aquifere mit 38 % bzw. 27 % Restvarianz (VA - Varianzanteil).
Varimax rotated factor patterns for waters from sedimentogenic and magmatogenic/metamorphic aquifers with 38 % and 27 % residual variance (VA - percent of variance).

sedimentogene Aquifere				magmatogene/metamorphe Aquifere			
Faktor VA	1 41 %	2 13 %	3 8 %	Faktor VA	1 51 %	2 15 %	3 7 %
Mg ²⁺	0,93			SO ₄ ²⁻	0,98		
SO ₄ ²⁻	0,92			K ⁺	0,97		
Ca ²⁺	0,79			Na ⁺	0,93		
HCO ₃ ⁻		0,78		Mg ²⁺	0,86		
Cl ⁻		0,62		Cl ⁻	0,83		
Na ⁺	0,57	0,57		HCO ₃ ⁻		0,89	
K ⁺				NO ₃ ⁻		0,51	
H ₂ EX			0,50	H ₂ EX		(-0,40)	
NO ₃ ⁻			(0,49)	³ H			
³ H			(0,44)	Ca ²⁺			0,92

ionen. Tabelle 12 zeigt die entsprechenden Mittelwerte, die ohne Einbeziehung von 5 % der Werte, die im Minimum- bzw. Maximumbereich liegen, berechnet wurden (sogenannte „5 % Trim“-Werte).

Tab. 12: „5 %-Trim“-Mittelwerte der Hauptionen in mg/l, der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit, dem Deuterium-Exzeß und Tritium.
 “5 %-trim”-means of the main ions [mg/l], specific electric conductivity, deuterium excess and tritium.

	sed.	nichtsed.
Na ⁺	458	153
K ⁺	3,3	2,0
Ca ²⁺	30	30
Mg ²⁺	52	30
HCO ₃ ⁻	404	334
Cl ⁻	311	102
SO ₄ ²⁻	527	149
NO ₃ ⁻	32	28
SiO ₂	11	13
LF [$\mu\text{S cm}^{-1}$]	2374	1050
H2EX [%o]	-0,01	2,2
³ H (T.U.)	7,0	14,1

In Grundwässern aus magmatogenen bzw. metamorphen Gesteinen treten untypisch hohe durchschnittliche Gesamtmineralisationen auf. Zum Vergleich geben beispielsweise E. MAZOR (1991) und G. MATTHESS (1990) obere Durchschnittswerte von 300 mg/l für Granite und saure Gesteine bzw. 400 mg/l für Basite an. Bedenkt man, daß von den 29 Proben dieser Analysengruppe 17 aus granitoiden Grundwasserleitern stammen, so weist auch der (normalerweise niedrigere) durchschnittliche Magnesiumgehalt, der etwa genau so hoch ist wie der des Calciums, auf eine Anreicherung hin.

Da in der Gruppe der sedimentogenen Grundwasserleiter sulfatische bzw. karbonatische Gesteine wie Gips, Anhydrit, Dolomit und Kalksteine nur in einem Aufschluß vertreten sind, müssen die Durchschnittswerte für spezifische elektrische Leitfähigkeit, Natrium, Hydrogenkarbonat, Chlor und Sulfat ebenfalls als erhöht bezeichnet werden.

Dies gilt insbesondere auch wegen des großen Anteils von psephitisch-psammitischen Aquiferen (35 von 66 Aufschlüssen), deren Wässer unter humiden Bedingungen geringere entsprechende Werte aufweisen (vgl. u. a. G. MATTHESS, 1990).

Jedoch treten zwei bemerkenswerte Unterschiede in den Faktorenmustern der beiden behandelten Analysengruppen für den ersten Faktor auf:

- Zum einen ist das Calcium nur für Wässer aus sedimentogenen Aquiferen im bestimmenden ersten Faktor hochgeladen, während es in magmatogenen Grundwasserleitern nur eine sehr untergeordnete Rolle zu spielen scheint. Dort ist es nur im wenig bedeutenden dritten Faktor mit hoher Ladung vertreten. Eine Deutung für diese Erscheinung ist aus Sicht vorliegender Untersuchungen nicht zu geben.

- Zum anderen ist das Chlorid bei den Wässern sedimentogener Aquifere nicht im ersten, sondern im zweiten Faktor hoch geladen. Das heißt, es wird mehr von Vorgängen beeinflusst, die diesen zweiten Faktor prägen.

Für Wässer sedimentogener Grundwasserleiter umschreibt der **zweite Faktor** – hauptsächlich besetzt mit Natrium, Hydrogenkarbonat und Chlorid – wahrscheinlich den Zusammenhang mit dem bereits genannten Ionenaustausch.

Für nichtsedimentogene Aquifere läßt die Ladung von Nitrat auf anthropogene bzw. Oberflächeneinflüsse schließen (der Deuterium-Exzeß besitzt hier eine Ladung von $-0,40$). Der hohe Wert für Hydrogenkarbonat ist an dieser Stelle kaum zu deuten.

Der bereits beschriebene Oberflächeneinfluß bestimmt offenbar den **dritten Faktor** in der Gruppe der Wässer sedimentogener Aquifere.

Die Verdunstung scheint hier direkt die Konzentrationen von Natrium und Chlor zu beeinflussen.

Beachtung verdient die Tatsache, daß dieser Zusammenhang ebenso für flache Aufschlüsse (vgl. Tab. 8), aber dort mit größerer Deutlichkeit, besteht. Die beschriebene Gruppierung von Variablen bestimmt dort den zweiten Faktor mit höherem Varianzanteil.

Nach der vorangegangenen Diskussion der Faktorenmuster drängt sich die Frage auf, weshalb trotz des postulierten hohen Einflusses der Verdunstung auf den Grundwasserchemismus der isotopische Indikator Deuterium-Exzeß niemals im ersten Faktor, sondern nur in Faktoren $\leq 15\%$ Varianzanteil mit hohen Ladungen vertreten ist.

Zur Interpretation dieses Sachverhaltes sind differenzierte Prozesse zu betrachten, die zur Ausprägung der genannten Merkmale führen:

1. Zahlreiche Niederschlagsereignisse geringer Ergiebigkeit tragen nicht zur Grundwasserneubildung bei, weil das Wasser vor dem Erreichen des Grundwasserspiegels verdunstet. Dabei kristallisiert die gelöste Stofffracht in Oberflächennähe aus oder geht – sofern vorhanden – ins Boden- bzw. Haftwasser über, wohingegen bei der mehr oder weniger vollständigen Verdunstung die ^{18}O - bzw. ^3H -Markierung weitgehend verlorengelht. Selbst wenn man davon ausgeht, daß durch eine unvollständige Verdunstung Deuterium und ^{18}O im Bereich der Evaporationsfront angereichert werden, so wird jedoch die gesamte, im Boden verbleibende Wassermenge entscheidend verringert. Dieser sich wiederholende Prozeß akkumuliert in der Aerationzone oder sogar an der Geländeoberfläche die im Niederschlag gelösten Ionen in unterschiedlichem Maße. Solche Fronten von Evaporationsrückständen in Form von Salzkrusten konnten u. a. C. SONNTAG et al. (1985) in Tiefen von 0–160 cm nachweisen. Die Ergebnisse der gleichen Autoren sowie von M. YOUSFI et al. (1985) zeigten auch, daß die Front der Anreicherung an Deuterium und ^{18}O nicht tiefer als 2 m ist.
2. Regenwässer von Ereignissen mit hinreichend großen Niederschlagshöhen infiltrieren bis zum Grundwasserspiegel, laugen dabei die angereicherten Evaporationsresiduen aus und tragen sie ins Grundwasser ein. Der Gehalt an ^{18}O , Deuterium und Tritium im Grundwasser wird wahrscheinlich maßgeblich durch den Gehalt in diesen meteorischen Wässern geprägt. Auf diese Weise entstehen auch die **relativ** großen Durchschnittswerte für den Deuterium-Exzeß (vgl. Tab. 12), welche ein Ausdruck dafür sind, daß die Wässer, die tatsächlich zur Grundwasserneubildung beigetragen haben, offenbar keiner intensiven Verdunstung ausgesetzt waren.

Aus den beschriebenen Faktorenmustern resultiert weiterhin die Frage nach der Bedeutung des Tritiums und damit nach der Rolle der mittleren Verweilzeit bei der Herausbildung der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers. Die gezeigten Ergebnisse, insbesondere die niedrigen Faktorenladungen des Tritiums, lassen darauf schließen, daß der Einfluß der mittleren Verweildauer des Grundwassers im Aquifer als wesentlich geringer einzuschätzen ist als die Bedeutung von oberflächennahen Vorgängen (Aufladung durch Evaporate, Feldspatverwitterung) oder die Rolle von Ionenaustauschprozessen.

5. Anhang

5.1. Das Computerprogramm MULTIS

Das vom Verfasser zur Durchführung dieser Arbeit entwickelte Computerprogramm MULTIS dient der Auswertung isopenhydrogeologischer Daten auf der Grundlage von gekoppelten Lumped Parameter Modellen. Im Programm kommen Reihen- und Parallelschaltungen der Grundmodelle Exponential-, Linear-, Konvektions-Dispersions- und Piston-Flow-Modell zur Anwendung. Insgesamt sind mehr als 30 Boxmodelle bzw. deren Kombinationen implementiert. Auftretende freie Parameter werden vom Programm durch eine Anpassung der Outputfunktion an die Meßwerte identifiziert.

Erstmals wird dabei routinemäßig die Güte der Modellkalibrierung dargestellt (Gütefunktion), sodaß der Nutzer Vorstellungen über die begrenzte Genauigkeit der getroffenen Aussagen erhält (siehe Tafel 1).

Weiterhin visualisiert das Programm die ermittelten theoretischen Modelloutputwerte sowie die Meßwerte (Fig. 48).

Von der (mittleren) Verweildauer des Grundwassers werden der Jungwasseranteil und der Verdünnungskoeffizient nach K. FRÖHLICH & R. GELLERMANN (1989) abgeleitet, die als Maß für die schadstoffunspezifische Geschützttheit von Grundwasserlagerstätten gegenüber einer potentiellen anthropogenen Kontamination gelten. Einflüsse wie Retardation, Sorption, Abbau usw. werden also nicht berücksichtigt. Weiterhin ist die Lösung der direkten Aufgabe (alle Modellparameter werden vom Nutzer eingegeben) möglich.

MULTIS sieht die Auswertung von Tritium-, Radiokohlenstoff-, Deuterium- und ^{18}O -Meßwerten vor. Darüber hinaus ist die Auswertung von Daten eines nutzerdefinierten Tracers möglich (siehe Tafel 2).

Es ist auch die gleichzeitige Auswertung von Daten aller Tracer in einem einzigen Berechnungslauf möglich. Alle Berechnungen können für den Zeitraum 1953–2034 wahlweise monats- oder jahresorientiert ausgeführt werden. Wesentliche Startparameter, wie Inputfunktionen, die Definition eines 5. Tracers, Abfrageoptionen u. a. können in einem Konfigurationsfile festgelegt werden, das bei Programmstart eingelesen wird.

MULTIS ist neben einem kontextsensitiven Hilfesystem mit einer Reihe von Umgebungs- und postprocessing-Funktionen ausgestattet und in der Nutzerführung weitgehend an den SAA-Standard angelehnt.

SAA-Systems Application Architecture: Standard für die Gestaltung von Nutzeroberflächen in Computerprogrammen.

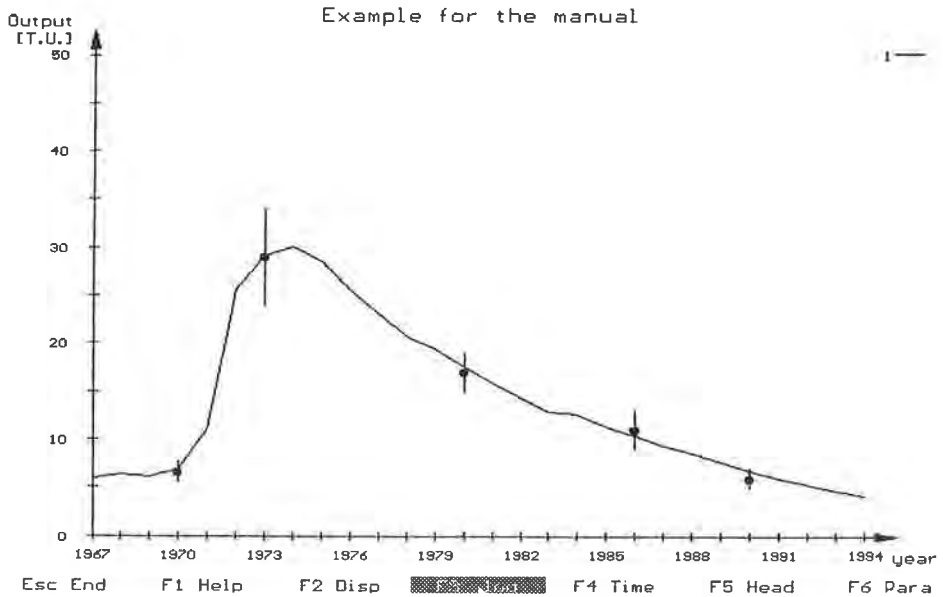


Fig. 48: Graphische Darstellung von Meßwerten und Modelloutput im Programm MULTIS.
Graphic presentation of measured values and model output in the program MULTIS.

Mit dieser Software werden Lumped Parameter Modelle einem breiten Anwenderkreis zur praktischen Nutzung und Untersuchung erschlossen. Haupteinsatzziele dabei sind u. a.:

- Grundwasserdatierung,
- Geschütztheitsbewertung von Grundwasserressourcen,
- Abschätzung der Grundwasserneubildung, -fließgeschwindigkeit,
- Festlegung von Trinkwasserschutzonen,
- Beurteilung des Fließregimes an Deponiestandorten.

Neben der Section of Isotope Hydrology der IAEA nutzen derzeit 58 wissenschaftliche und Praxiseinrichtungen in 30 Ländern auf fünf Kontinenten das Programm (Stand 12. 4. 1995).

Technische Angaben:

a) Hardware

Computertyp:

IBM PC-AT und 100% kompatibel

benötigter Hauptspeicherplatz:

etwa 520 kByte

Graphik-Karte:

Farb-VGA

benötigter Festplattenplatz:

etwa 1,2 MByte

numerischer Koprozessor erforderlich

b) Software

Betriebssystem:

MS-DOS 4.01 oder höher

Zusatzdateien

(jeweils in deutsch und englisch):

ASCII-Hilfefile mit je etwa 1850 Zeilen

Konfigurationsfiles mit je etwa 180 Zeilen

Installationsprogramm

c) Programmbeschreibungen sind in gedruckter Form in deutscher und englischer Sprache zu je etwa 50 Seiten verfügbar (J. RICHTER & P. SZYMCAK, 1992).

Zielrichtungen für eine Weiterentwicklung

- Erstellung und Bearbeitung von Inputfunktionen unter Nutzung verschiedener Algorithmen.
- Implementierung eines tagesbezogenen Berechnungsmodus' für die Auswertung von Versuchen mit künstlich injizierten Tracern.
- Implementierung zusätzlicher, speziell für das Festgestein entwickelter Modelle.
- Für die Erstellung der Gütefunktion: variable Längen der Abtastintervalle für kleine mittlere Verweilzeiten.
- ¹⁸O-²H-Diagramme.
- Lesen/Schreiben von Meßwerten aus/in Dateien.
- Batch-processing zur effektiven Bearbeitung zeitaufwendiger Berechnungen.

5.2. Das Computerprogramm BMI

Das von V. DUNGER (1989, 1992) entwickelte Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAM (vgl. Abschnitt 2.4.1.1.) liegt bereits seit längerem als Computercode in einer erprobten Version vor, war aber für eine praktische Nutzung zur Berechnung von Neubildungsmengen und Tritiuminputwerten aus verschiedenen Gründen weitgehend unzugänglich.

Dies bezieht sich vor allem auf folgende Punkte:

- Im Quelltext waren die meteorologischen Werte für Freiberg fest implementiert bzw. hätten individuelle Daten jeweils per Hand einzeln von Tastatur eingegeben werden müssen.
Zudem war der Programmablauf auch für routinemäßige Eingaben sehr stark interaktiv gestaltet, sodaß der Nutzer zur Abarbeitung eines Programmlaufes über lange Zeit hinweg sich auf den Dialog mit dem Programm konzentrieren mußte.
- Die Ausgabe der Ergebnisse konnte nur auf Drucker oder Bildschirm erfolgen.
- Die Ablaufgeschwindigkeit des Programmes war wegen des Fehlens einer ausführbaren Programmdatei („*.EXE“) sehr niedrig.
- Es war nicht möglich, die Ergebnisse des Programmlaufes sofort als Werte für eine Tritiuminputfunktion zu verwenden, da keine Wichtung der Tritiuminputkonzentrationen entsprechend der unterschiedlichen Neubildungsbeträge vorgesehen war.

Um ein praktikables Instrument zur Berechnung der Tritiuminputfunktion zu erhalten, wurden vom Verfasser im Rahmen dieser Arbeit sowohl entsprechende Modifizierungen am Programm selbst vorgenommen (modifiziert: BOWAM-2.EXE) als auch ein als Shell für BOWAM fungierendes Programm erstellt, das verschiedene Funktionen eines pre- und postprocessing enthält (siehe Fig. 49, Fig. 50).

Da für das Modell BOWAM bereits detaillierte Beschreibungen existieren, seien an dieser Stelle nur die Veränderungen skizziert:

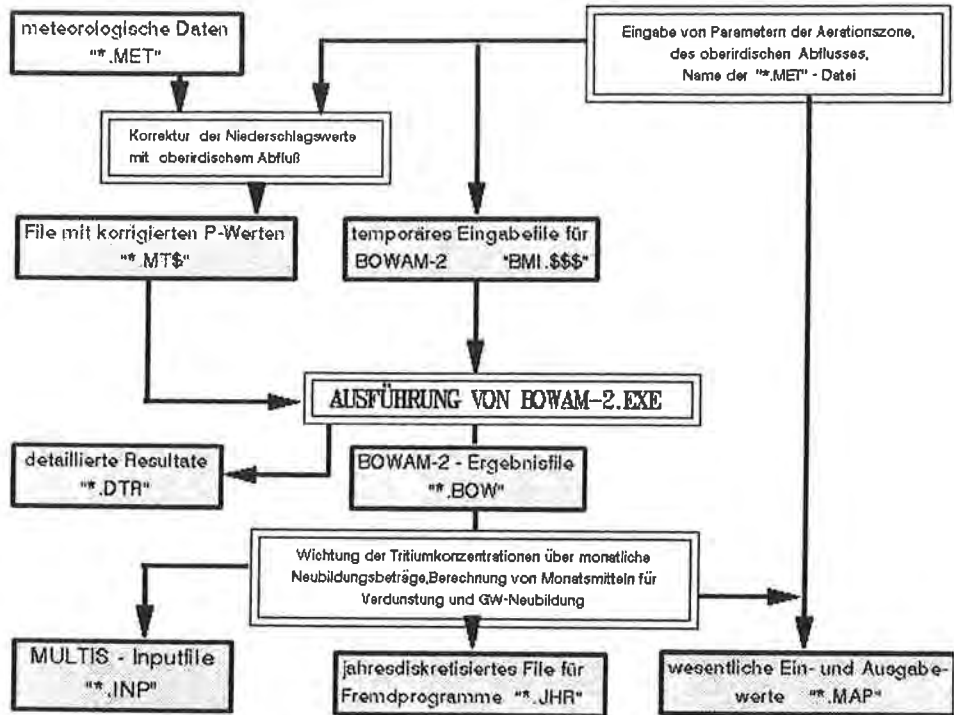


Fig. 49: Einbindung der modifizierten BOWAM-Version BOWAM-2 in das Shellprogramm BMI sowie die Funktion der beteiligten ASCII-Files.
 Integration of the modified version of BOWAM BOWAM-2 in the shell program BMI as well as the function of the ASCII-Files involved.

1. Meteorologische Daten werden ebenso wie Parameter für die Beschaffenheit der Aerationzone jeweils aus einem ASCII-File gelesen.
2. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in ASCII-Files.
3. Es wurde eine ausführbare Form des Codes erzeugt.
4. Die Nutzeraktivitäten wurden auf das notwendige Maß reduziert.
5. Für die Größen Niederschlag, Verdunstung und Grundwasserneubildung werden Mittelwerte berechnet, und zwar für:
 - a) den gesamten Zeitraum, für den meteorologische Daten vorliegen,
 - b) jedes Jahr,
 - c) die Monate Januar bis Dezember.

Da im Gegensatz zu MULTIS bislang noch keine schriftliche Dokumentation für BMI vorliegt, seien die Hauptmerkmale kurz vorgestellt. Den prinzipiellen Programmablauf und die Funktion der einzelnen Files verdeutlicht Fig. 49. Das Programm BOWAM-2 läuft also als integrierter Tochterprozeß innerhalb von BMI.

Die einzelnen ASCII-Files haben folgenden grundlegenden Aufbau:

1. Das vom Nutzer zu erstellende „*.MET“ File mit den meteorologischen Daten. In jeder Zeile eines solchen Files müssen, beginnend mit Januar 1953, folgend

```

BM)  BOWAM2-HELIS - Interface (C.J. Richter 1993)
-----
BOWAM2-File: SAND5_B04          HELIS-File: SAND5_INP

          BOWAM2
          Modelling of unsaturated zone moisture
          Modelling by U. DINGER, implementation by U. BUNGER & J. RICHTER

          Calculating values for t = 1967

          meteorological data from file : C:\MSP\NR\BMI\FREIBERG.MEI
          kind of soil      : 1 (sand=1, sand.inar=2, loam=3)
          kind of usage    : 1 (field=1, meadow=2, forest=3)

          total thickness : 5000  mm
          input before 1953: 5.0

          Sun rad. data as : mean duration per day [h]
          Geogr. latitude : 50.655  min

          *.B04 *.INP *.JHR file : SAND5
          Area surface runoff [L/3]: 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30

```

Fig. 50: Bildschirmausdruck des Programmes BMI während des Laufes von BOWAM-2. Im unteren Teil sind die vom Nutzer vorher eingegebenen Parameter angezeigt.
 Screen of the program BMI during the operation of BOWAM-2. In the lower part, the parameters entered by the user are displayed.

bis zum Dezember eines Jahres vor 2035 Monatsdurchschnittswerte nach Tab. 13 enthalten sein. Die Sonnenscheindauer kann sowohl als monatliche Summe als auch als Tagesdurchschnittswert enthalten sein (spätere Abfrage und Umrechnung im Programm BMI). Im letzten erfaßten Jahr sollten Werte für alle Monate enthalten sein.

Tab. 13: Struktur einer Zeile in einem *.MET-ASCII-Datenfile für das Programm BMI.
Structure of a line in a *.MET-ASCII data file for the BMI program.

Monat [Einheit]	Jahr	Temp. [°C]	Sonnenschein- dauer [h]	rel. Luftfeuchte [%]	Niederschlag [mm]	C _{H-3} [T.U.]
Minimum		-30	0	1	0	0
Maximum		40	500 bzw. 15	99	1000	9999

2. Die „*.MT\$“-Dateien haben denselben Aufbau, jedoch enthalten sie korrigierte Werte in der Spalte des Niederschlages. Diese resultieren aus der Berücksichtigung eines durchschnittlichen monatlichen Oberflächenabflusses, ausgedrückt in Prozent (Niederschlag = 100 %). Die Wichtung erfolgt nach Gl. (8).
3. Das von BOWAM-2 zur Parameterübernahme genutzte File BMI.\$\$\$ enthält:
 - den Namen des „*.MT\$“-Files,
 - in programmspezifischer Form die vorher vom Nutzer eingegebenen Werte für Bodenart, Nutzungsart, Mächtigkeit der Aerationzone, ³H-Inputkonzentration für die Zeit vor 1953, Art der Angabe der Sonnenscheindauer, geographische Breite,
 - den Namen des BOWAM-Ausgabefiles.
4. Die „*.BOW“-Ergebnisdateien von BOWAM-2 enthalten in den einzelnen Zeilen jeweils: Monat, Jahr, Grundwasserneubildung [mm/mon], Tritiumkonzentration im Neubildungsbeitrag [T.U.], Evapotranspiration [mm/mon].
5. Ergebnis der Wichtung der Tritiumkonzentrationen sind „*.INP“-Dateien, die in jeder Zeile neben Monat und Jahr nur noch eine Angabe der Tritiumkonzentration enthalten. Diese Dateien haben das Format von MULTIS-Inputdateien.
6. Für eventuelle graphische Darstellungen durch Fremdprogramme eignen sich die „*.JHR“-Dateien, die einen jahresdiskretisierten Aufbau haben und in jeder Zeile folgende Werte enthalten: Jahr, Niederschlag, Niederschlag – Oberflächenabfluß, Grundwasserneubildung, Evapotranspiration, Tritiuminputkonzentration.
7. „*.MAP“-Dateien enthalten wesentliche Eingabeparameter sowie Mittelwerte für Niederschlag, Verdunstung und Grundwasserneubildung als ein Jahresmittelwert sowie je 12 Monatsmittelwerte für den gesamten betrachteten Zeitraum.

5.3. Daten zu Abschnitt 4.

Tab. 14: Identdaten der in der Mongolei beprobten Aufschlüsse. Erläuterungen zu den einzelnen Spalte Probe; 2 – Tiefe des Brunnens [m]; 3, 4 – Hangend- bzw. Liegendgrenze des Aquifers [m unter Gelände]; 5, 6 – Hangend- bzw. Liegendgrenze der Filterstrecke [m unter Gelände]; 7 – Grundwasserabstand [m]; 8 – G: gespannt, U: ungespannt, u: ungespannt (unsicher); 9 – lithologische Beschreibung der wasserführenden Schichten, dabei „!“ nach mongolischer Originalansprache des Aquifergestein entnommen aus geologischer Karte (unsicher), „*“ Originalansprache widerspricht mehr oder weniger der Information aus der Karte [in eckigen Klammern]; 10 – S: sedimentogenes Gestein, M: magmatisches oder metamorphes Gestein, (M): Behandlung als sedimentogenes Gestein (siehe Spalte 11); 11 – L: Lockergestein, F: Festgestein. Standen nur Informationen aus der geologischen Übersichtskarte-Gesteinsansprache zur Verfügung (? in Spalte 9), wurde aufgrund der wahrscheinlichen tieferreichenden physikalischen Verwitterung (siehe Aufschlüsse mit „!“ in Spalte 9), insbesondere für flachschlüsse, der Lockergesteinstyp eingesetzt. Diese Aufschlüsse sind gekennzeichnet mit „(F)→L“. Zu den Aufschlüssen E 1, E 2, Un 13 liegen keine Informationen vor. (Fortsetzung S. 172–175.)

Data of the sampled wells (Mongolia). Comments to the several columns: 1 – sample; 2 – depth of the filter screen [m below surface]; 3, 4 – upper and lower boundary of the aquifer [m below surface]; 5, 6 – upper and lower boundary of the filter screen [m below surface]; 7 – depth of ground water table [m]; 8 – G: confined, U: unconfined, u: unconfined (uncertain); 9 – lithologic description of the water bearing formation: “!” – according to original mongolian description of the aquifer, “?” – adopted from geologic map (uncertain), “*” – original description contradicts the information from the geologic map [in square brackets]; 10 – S: sedimentogenic rock, M: magmatogenic or metamorphic rock, (M): considered as sedimentogenic rock (see column 11); 11 – L: loose rock, F: hard rock. If only information from the general geologic map were available for rock description (? in column 9), the type of loose rock was assumed because of deep penetrating physical weathering (see outcrops with “!” in column 9), in particular for shallow outcrops. These outcrops are marked by “(F)→L”. For the outcrops E 1, E 2 and Un 13 no information available. (Continuation see p. 172 to 175.)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DN 1	43,00	17,0	40,0			3,5	G 3	Blöcke und Gesteinsschutt in sandiger Matrix [Granit]	S	L
DN 3r	4,00	0,0	4,0			1,0	U 3	Granit (P2)	(M)	(F)→L
DN 4	20,00	4,0	20,0			2,5	U andig-	„argillitisches“ Sediment [Granit]	S	L
DN 5	7,00	2,5	7,0			2,2	U 3	Granit (PZ1)	(M)	(F)→L
DN 6	9,00	4,0	9,0			4,0	U 3	Carbon: Konglomerate usw.	S	(F)→L
DN 8	24,00	10,0	22,0			2,5	U andig-	„argillitisches“ Sediment [Granit]	S	L
DN 10	25,00	8,0	23,0			3,0	U ndig-	„argillitisches“ Sediment	S	L
DN 11r	25,00	5,0	25,0			4,0	G	uartär		S L
DN 14	8,50	6,5	8,5			2,0	U 3	Creide: Sandstein . . .	S	(F)→L
DN 15r	9,00	2,0	9,0			3,0	U 3	Carbon: Konglomerate usw.	S	(F)→L
DN 16	48,00	28,0	33,0			5,0	G	3		L
		38,0	43,0					G		L
		58,0	62,0			51,3		G		L
DN 17	95,00	69,0	74,0					G		L
		82,0	95,0					G		L
		6,0	9,0			1,4		G		L
DN 18	30,00	24,0	27,0					G		S L
		14,0	19,0			10,0		G		F
DN 20	82,0	64,0	75,0					G		L
		71,0	81,0			2,0		G		S L
DN 21	113,0	92,0	110,0					G		L
		0,0	4,0			1,0		G		L
DS 10r	4,0	0,0	4,0					G		F
DS 12	32,0	9,0	12,0			9,0		U		S
		13,0	16,0					U		L
		35,0	45,0					U		S L
DS 13	55,0	11,0	17,0			6,0		U		F
		21,0	27,0					U		L
		10,0	25,0			2,8		U		(M)
DS 14r	25,0	10,0	25,0					U		F
DS 16	4,0	0,0	4,0			1,0		U		(M)
DS 17	11,0	2,0	11,0			3,5		U		(M)
DS 18	4,0	0,0	4,0			1,0		U		(M)
DS 20r	4,0	0,0	4,0			1,0		U		(M)
U 1	9,0	1,0	9,0			2,5		U		S
U 3	9,0	5,0	9,0			3,5		U		(F)→L
U 4	4,0	0,0	4,0			1,0		U		(F)→L
U 5	8,5	5,5	8,5			4,5		U		(F)→L
								U		M

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U 6	23,0	11,0	18,0			4,0	G	eklüfteter Tonschiefer		S F
U 7	102,0	43,0	55,0			24,0	G	eklüfteter silifizierter Tonschiefer [Sandstein]	S	F
		76,0	87,0				G	eklüfteter silifizierter Tonschiefer [Sandstein]	S	F
U 8	4,0	0,0	4,0			1,0	U	lkstein (Information aus Probenahme)	S	F
U 9	97,0	55,0	72,0			30,0	G	ies und Gesteinsschutt in sandiger Matrix	S	L
		76,0	87,0				G	hotter in sandiger Matrix	S	L
U 10	90,0	53,0	63,0			42,0	U	eklüfteter Ton-(Schluff-)stein [Sandstein]	S	F
		76,0	87,0				G	eklüftetes Konglomerat [Sandstein]	S	F 1
U 11	4,0	0,0	4,0			1,0	U	Kreide: Sandstein	S	F
U 12	50,0	5,0	9,0			4,0	U	ndig-„argillitisches“ Sediment	S	L
		13,0	16,0				U	nd	S	L
		35,0	45,0				U	eklüfteter Sandstein	S	F
U 15	13,0	23,0	132,0			8,0	G	hr stark geklüfteter Sandstein	S	F
U 16	130,0	105,0	125,0			38,0	G	ndig-argillitisches Sediment	S	L
U 17	115,0	70,0	108,0			47,0	G	and [Sandstein]	S	L
U 19	4,0	0,0	4,0			1,0	U	reide: Sandstein	S	(F)→L
U 20	4,0	0,0	4,0			1,0	U	evon: Sandstein, kalkige Schiefer	S	(F)→L
U 21	6,0	0,0	3,0			1,0	U	evon: Sandstein, kalkige Schiefer	S	(F)→L
U 22	70,0	47,0	67,0			1,2	G	eklüftetes Effusivgestein	M	F
U 23	5,0	1,0	5,0			2,0	U	evon: Sandstein, kalkige Schiefer	S	(F)→L
U 24	46,0	10,0	20,0			1,2	U	eklüfteter Tonstein	S	F
Un 1	64,0	7,0	48,0			7,0	G	eklüfteter Andesit bis Basalt	M	F
Un 2	100,0	30,0	40,0	31,0	41,0	12,0	G	hutt, Geröll in sandiger Matrix	S	L
		52,0	60,0	52,0	60,0		G			
		70,0	81,0	70,0	81,0		G			
Un 3	8,0	6,0	8,0	6,0	8,0	4,0	U	ndig-argillitisches Sediment	S	L
Un 4	6,0	3,0	6,0	3,0	6,0	4,5	U	ndig-argillitisches Sediment	S	L
Un 7	8,0	6,0	8,0	6,0	8,0	3,0	U	ndig-argillitisches Sediment	S	L
Un 8	13,0	3,0	13,0	5,0	13,0	4,5	U	hutt von metamorphem Gestein	S	L
Un 9	116,0	61,0	71,0	65,0	71,0	45,0	G	nd, Kies mit Toneinlagerungen	S	L
		87,0	99,0	88,0	97,0		G			
Un 12	104,0	34,0	46,0	72,0	75,0	17,0	G	ndiges Sediment mit Kies, Kies mit Tonschichten und Sand	S	L
		72,0	87,0	82,0	87,0		G	ndiges Sediment mit Kies, Kies mit Tonschichten und Sand	S	L
Un 15	57,0	21,0	29,0	21,0	29,0	39,0	U	eklüfteter Granit	M	F
Un 16	6,0	3,0	6,0	3,0	6,0	3,0	U	eklüfterer Granit	M	F
Un 17	10,0	5,0	10,0	5,0	10,0	3,2	U	ndig-argillitisches Sediment	S	L
Un 18	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	U	eklüfteter Granit	M	F
Un 19	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	U	eklüfteter Granit	M	F
E 1 (S)	Quelle						U	eklüfteter Kalkstein		
E 2 (S)		5,5	9,5	4,0	9,4	2,2	U	nd, Kies, geklüftetes Konglomerat	S	L
		16,0	22,0	16,0	21,0		U	nd, Kies, geklüftetes Konglomerat	S	L
		28,0	38,0	33,0	38,0		U	nd, Kies, geklüftetes Konglomerat	S	L
O 1	130,0	30,0	39,0	30,0	39,0	1,0	G	nd und Schutt, Kies und Geröll, geklüfteter Sandstein	S	L
		57,0	69,0	56,0	69,0		G	nd und Schutt, Kies und Geröll, geklüfteter Sandstein	S	L
		76,0	90,0	79,0	90,0		G	nd und Schutt, Kies und Geröll, geklüfteter Sandstein	S	L
O 2	104,0	29,0	49,0	28,0	39,0	19,0	G	es u. Geröll in sandiger Matrix, Argillit, Kies, Granitblöcke	S	L
		56,0	60,0	57,0	87,0		G	es u. Geröll in sandiger Matrix, Argillit, Kies, Granitblöcke	S	L
		65,0	75,0	96,0	104,0		G	es u. Geröll in sandiger Matrix, Argillit, Kies, Granitblöcke	S	L
		97,0	104,0							

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
O 3	114,0	32,0 57,0 78,0 98,0	41,0 67,0 89,0 101,0	30,0 58,0 77,0	40,0 69,0 96,0	25,0	Grgillit, geklüfteter Sandstein und Konglomerat Grgillit, geklüfteter Sandstein und Konglomerat Grgillit, geklüfteter Sandstein und Konglomerat	S S S	F F F	
M 1	190,0	84,0 128,0	103,0 157,0	85,0 130,0	100,0 155,0	64,0	Uies, Geröll, Blöcke in sandigem Lehm Uies, Geröll, Blöcke in sandigem Lehm	S S	L L	
M 2	170,0	120,0 148,0	140,0 160,0	119,0 148,0	139,0 160,0	75,0	U:tritisches Gestein, Steine mit Kies in sandiger Matrix	S	L	
M 3	136,0	84,0	134,0	82,0	130,0	32,0	U:tritisches Gestein mit Kies in sandigem Lehm	S	L	
M 4	2,0	1,0	2,0			1,0	U:klüfteter Granit	M	F	
M 5	120,0	69,0	88,0	69,0	87,0	40,0	U'echsellagerung von Schutt und sandigem Lehm	S	L	
M 6	94,0	30,0 48,0 64,0	35,0 55,0 77,0	30,0 48,0 66,0	46,0 55,0 77,0	24,0	U nd.-argill. Sediment, Schutt, detrit. Gestein in sand. Matrix U nd.-argill. Sediment, Schutt, detrit. Gestein in sand. Matrix U nd.-argill. Sediment, Schutt, detrit. Gestein in sand. Matrix	S S S	L L L	
G 1	62,0	13,0 35,0 53,0	23,0 45,0 60,0	13,0 35,0 53,0	23,0 45,0 60,0	6,0	Uies und detrit. Gestein in sandiger Matrix Gies und detrit. Gestein in sandiger Matrix Gies und detrit. Gestein in sandiger Matrix	S S S	L L L	
G 2		(Tiefbrunnen)				8,8	u:hm mit Kies	S	L	
G 3	9,0	4,0	6,0	4,0	6,0	3,0	U:hm mit Kies	S	L	
G 4		(Flachbrunnen)				4,0	u:hm mit Kies	S	L	
G 5	10,0	4,0	10,0	7,0	9,0	3,5	U:n mit Zwischenlagen von Kies und Geröll	S	L	
G 6	50,0	11,0 27,0 38,0	19,0 30,0 40,0			3,0	Gklüfteter Granit Gklüfteter Granit Gklüfteter Granit	M M M	F F F	
G 7	Quelle						u:luftzone des Granites	M	F	
G 8	8,0	3,5	7,0	3,5	7,0	2,5	Gndiger Lehm	S	L	
G 9	21,0	5,5 16,0	8,5 19,0	5,0 16,0	8,0 18,0	2,5	U:hm mit Kies und Schutt G:hm mit Kies und Schutt	S S	L L	
G 10	25,0	9,0	22,0	15,0	21,0	3,0	G:tritisches Gestein in sandiger Matrix	S	L	
G 11	70,0	14,0 36,0 56,0	24,0 45,0 67,0	12,0 35,0 57,0	23,0 45,0 67,0	5,5	Uklüfteter Tonstein, Konglomerat Gklüfteter Tonstein, Konglomerat Gklüfteter Tonstein, Konglomerat	S S S	F F F	
G 12	33,0	12,5	33,0	11,0 16,0	16,0 23,0	3,0	G:tritisches Gestein in sandiger Matrix G:tritisches Gestein in sandiger Matrix	S S	L L	
G 13	42,0	18,0	40,0	18,0	38,0	0,0	Gklüfteter Granit	M	F	
G 14	21,0	6,0	20,0	17,0	19,0	3,0	Gklüfteter Granit	M	F	
G 15	2,0	0,3	2,0				Uklüfteter Granit	M	F	
G 16	8,5	1,6	6,5	3,0	7,0	1,9	U nd	S	L	
G 17	70,0	31,0 50,0	40,0 60,0	31,0 50,0	40,0 60,0	4,5	G:tritisches Gestein, Schutt, Kies G:tritisches Gestein, Schutt, Kies	S S	L L	
G 18	11,0	7,0	11,0	7,0	9,0	3,5	Ues und Schutt in sandiger Matrix	S	L	
G 19	10,0						U			
G 20	7,0	4,5	7,0	4,5	6,0	2,5	Ues in sandig-argillitischer Matrix	S	L	
G 21	8,0						U			
G 22	8,0	3,7	8,0	4,0	7,0	2,0	U:nd und Kies	S	L	
G 23	28,0	14,0	15,0	14,0	24,0	6,0	U:utt und Kies in Lehm	S	L	
G 24	26,0	10,0	23,0	14,0	22,0	3,0	U:ritisches Gestein in sandiger Matrix	S	L	
G 25	6,0	3,0	6,0	3,0	5,0	3,0	Ues in sandiger Matrix	S	L	
G 26	26,0	10,0	22,0	16,0	21,0	0,9	U:utt, Kies	S	L	
G 27	2,0	0,0	2,0			1,0	U:klüfteter Granit	M	F	
G 28		(55)	75,0	(55)	72,0	8,8	U:dig-argillitisches Sediment	S	L	

Tab. 15: Gemessene $\delta^{13}\text{C}$ - und ^{14}C -Gehalte in Grundwässern der Dundgobi-Provinz.
 $\delta^{13}\text{C}$ and ^{14}C content of the groundwater of the Dundgobi Province.

Probe	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	^{14}C [pmc]
DN 1	-7,56	58,5 ± 1,1
DN 8	-7,72	47,4 ± 1,6
DN 10	-7,73	45,4 ± 0,9
DN 15r		69,2 ± 1,7
DN 16	-9,15	86,4 ± 1,4
DN 20	-9,07	96,9 ± 2,3
DS 13	-9,72	51,1 ± 1,6
DS 14r		44,5 ± 0,9
DS 20r		41 ± 1,1
U 7	-6,27	0,2 ± 0,5
U 9	-5,35	0 ± 1
U 12	-6,04	11,7 ± 0,7
U 17	-10,21	0 ± 0,7
U 22	-7,65	0 ± 0,5
U 24	-9,09	73 ± 2
E 2		79,9 ± 1,3
Un 13		66,8 ± 1,0
O 1		16,2 ± 0,5
M 1		35,5 ± 0,8
M 2		38,9 ± 0,8
G 1		78,7 ± 1,8
G 2		92,4 ± 2
G 28		76,5 ± 1,8

Tab. 16: Isotopen- und hydrochemische Messwerte von Grundwässern der Dumdgobi-Provinz; spezifische elektrische Leitfähigkeit LF in $\mu\text{S cm}^{-1}$, nicht bezeichnete Konzentrationen in mg/l. Probenbezeichnung, die Buchstaben stehen für die Teiluntersuchungsgebiete: DN – Deren, DS – Delgersotog, G – Gurvansaihan, O – Olgoingobi, M – Mandalgov, Un – Undershil, U – Ulsit. BP – 60 ml Filtrat aus 225 g Boden, versetzt mit 150 ml Wasser; Probe genommen im Gebiet Deren; der Boden war augenscheinlich reich an Evaporationsresiduen. (Fortsetzung S. 178–179.)
 Isotopic and hydrochemical values of ground waters from the Dumdgobi Province; specific electrical conductivity LF in $\mu\text{S cm}^{-1}$, not labeled concentrations in mg/l. Sample, the letters mark the sub areas of investigation: DN – Deren, DS – Delgersotog, G – Gurvansaihan, O – Olgoingobi, M – Mandalgov, Un – Undershil, U – Ulsit. BP – 60 ml filtrate from 225 g soil in 150 ml water; the sample was taken in the region Deren. Apparently, the soil was enriched in evaporation residues. (Continuation see p. 178 to 179.)

Probe	^3H [T.U.]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^2\text{H}$ [‰]	LF	T (°C)	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SiO ₂
DN 1	1,60 ± 0,2	-11,69	-90,60	981	3	8,24	103,3	1,2	44,2	48,3	291,1	78,7	129,7	67,2		14,6
DN 3r	5,29 ± 0,43	-11,75	-89,80	1534	5	8,31	231,55	1,78	49,92	60,41	420,89	126,5	212,6	151,1		12,5
DN 4	25,70 ± 0,5	-9,82	-81,10	1120	3	8,40	153,3	1,9	34,4	41,7	210,2	95,0	267,8	5,0	4,4	6,6
DN 5	17,50 ± 0,4	-9,94	-82,00	1350	2	8,00	129,5	2,9	64,5	79,3	502,0	97,1	228,3	4,2		11,9
DN 6	8,10 ± 0,3	-10,69	-86,20	3770	2,5	8,25	404,8	8,4	133,3	350,4	733,5	150,3	1758,0	9,2		10,9
DN 8	6,00 ± 0,3	-11,38	-89,60	7590	3	8,26	1581,3	32,5	90,8	268,7	775,0	822,5	2908,0	Spuren		7,1
DN 10	4,60 ± 0,2	-10,70	-85,70	813	3	8,12	63,1	2,9	28,0	51,4	425,9	27,8	82,1	8,9		9,4
DN 11r	8,76 ± 0,49	-11,75	-91,00	11120	2	7,96	2458,5	22,3	188,9	529,0	879,3	675,8	6313,3	0,0		12,8
DN 14	9,60 ± 0,3	-12,14	-93,70	4620	3,5	8,22	1008,3	7,7	64,3	101,1	812,6	426,2	1471,0	Spuren		9,9
DN 15r	7,65 ± 0,49	-13,60	-103,60	4733	3	8,18	781,7	21,0	189,5	209,7	499,8	304,6	1924,9	199,0		15,1
DN 16	66,60 ± 0,9	-14,72	-112,10	731	5	8,24	76,7	1,6	48,4	25,5	288,6	32,7	89,2	36,0		11,5
DN 17	0,10 ± 0,2	-12,31	-94,00	4610	5	8,05	952,0	6,2	71,4	124,3	817,4	478,9	1366,5	86,3		8,0
DN 18	0,60 ± 0,2	-13,41	-102,70	980	5	8,05	102,2	2,3	46,1	36,0	259,0	85,3	200,0	0,0		14,9
DN 20	100,00 ± 1,3	-13,64	-105,20	638	5,5	8,18	65,5	1,9	40,9	23,4	293,2	24,3	56,7	22,9		10,2
DN 21	0,00 ± 0,2	-12,43	-95,70	616	5	8,76	84,8	1,5	12,4	31,8	258,5	34,6	54,3	0,0	15,3	2,6
DS 10r	122,79 ± 2,91	-12,32	-88,70	140,3	4	6,19	6,9	1,4	15,6	2,5	40,3	2,2	12,4	6,2		2,5
DS 12	25,50 ± 0,5	-11,80	-86,60	182	3,5	7,93	13,3	0,9	18,0	4,1	98,1	5,3	5,0	0,0		3,8
DS 13	4,20 ± 0,3	-11,81	-88,70	420	5	8,06	39,2	1,0	33,6	11,5	196,9	15,2	27,3	18,5		14,0
DS 14r	10,13 ± 0,52	-10,98	-85,60	635,3	5	8,37	91,7	0,5	14,4	23,0	265,4	29,6	64,3	7,2	5,4	6,5
DS 16	2,70 ± 0,3	-11,51	-86,90	494	2,5	8,12	27,3	1,0	56,2	13,8	205,6	22,2	31,6	33,7		14,2
DS 17	0,30 ± 0,2	-10,11	-82,30	830	2	8,22	85,8	2,4	50,9	31,6	250,3	15,8	223,0	0,0		7,7
DS 18	3,00 ± 0,3	-11,38	-88,00	1080	4	8,30	120,5	2,0	45,2	52,1	388,1	72,9	128,8	27,7		16,6
DS 20r	0,73 ± 0,33	-11,63	-90,10	2657	2,5	7,57	308,3	4,2	121,8	122,9	216,0	439,9	664,2	0,0		8,3
U 1	0,30 ± 0,2	-11,60	-94,90	1390	8,5	8,03	249,9	2,5	30,6	26,6	318,3	160,8	205,7	5,0		11,4
U 3	0,00 ± 0,2	-10,87	-90,10	3590	8,5	8,67	546,5	2,5	44,1	192,3	500,4	431,4	869,3	0,0	35,9	9,1
U 4	1,60 ± 0,2	-11,01	-89,10	3200	9	8,59	397,3	9,1	67,2	236,4	552,7	259,0	954,3	10,0	29,4	12,1

Tab. 17: Zusatzinformationen für die 1990 beprobten Aufschlüsse nach S. SANJDORJ (1993). Rechte Spalte (Anteil EM_{EPM}): Anteil des Exponentialmodelles am Exponential-Piston-Flow-Modell, der sich bei Verwendung der Entfernungen in Spalte 4 und 5 ergibt. Die verbleibenden Brunnen Un 7, Un 8, Un 9, Un 12, Un 17, G 15, G 19, G 21 befinden sich in ihrem jeweiligen Speisungsgebiet, d. h., es besteht keine Mindestdistanz zwischen Brunnen und Neubildungsgebiet.

Additional information for outcrops sampled in 1990, according to S. SANJDORJ (1993). Right column (" EM_{EPM} "): Fraction of the exponential model in the exponential-piston flow model, obtained by using the distances in columns 4 and 5. The remaining wells Un 7, Un 8, Un 9, Un 12, Un 17, G 15, G 19, G 21 are situated in their respective catchment area, i.e. there is no minimum distance between well and recharge area.

Brunnen- bez.	Höhe [m NN]		Entf. Brunnen – Speisungsgebiet [km]		Anteil EM_{EPM} [%]
	Brunnen	Speisungsgebiet	von	bis	
Un 1	1160	1260	1	4,5	78
Un 2	1150	1260	1	5	80
Un 3	1107	1165	3	4	25
Un 4	1110	1165	3	4	25
Un 15	1170	1256	2	8	75
Un 16	1120	1180	2	3	33
Un 18	1155	1260	2	5,5	64
Un 19	1165	1227	2	6	67
G 1	1170	1300	2	15	87
G 2	1165	1300	2	15	87
G 3	1169	1250	0,5	2	75
G 4	1170	1300	2	15	87
G 5	1170	1252	1,5	3,5	57
G 6	1420	1499	1	2	50
G 7	1300	1565	4	11	64
G 8	1180	1270	2	6	67
G 9	1120	1212	3	5	40
G 10	1087	1129	1	5	80
G 11	1085	1167	2	3	33
G 12	1070	1180	1	8	88
G 13	1057	1164	2	4	50
G 14	1170	1180	2	6	67
G 16	1106	1260	8	15	47
G 17	1090	1165	2	5	60
G 18	1240	1280	1	2	50
G 20	1230	1364	1	5,5	82
G 22	1375	1430	2	4	50
G 23	1340	1420	2	4	50
G 24	1276	1371	3	7	57
G 25	1250	1280	1	3	67
G 26	1158	1270	2	4	50
G 27	1318	1361	2	8	75
G 28	1175	1300	2	15	87
M 1	1440	1563	1	6	83
M 2	1435	1563	1	6	83
M 3	1443	1563	1	6	83
M 4	1460	1563	3	5	40
M 5	1420	1563	1	6	83
M 6	1420	1563	1	6	83
O 1	1380	1593	6	13	54
O 2	1420	1593	7	9,5	26
O 3	1400	1593	6	13	54

Tab. 18: Zusatzinformationen für die 1988 beprobten Aufschlüsse nach K. FRÖHLICH (1988). Für die nachfolgenden Aufschlüsse liegen Schätzungen über die Entfernung der Brunnen zum vermutlichen Infiltrationsgebiet, den Höhenunterschied, Temperaturangaben sowie verbale Lagebeschreibungen (K. FRÖHLICH, 1988) vor. (Fortsetzung S. 182.)
 Additional information for outcrops sampled in 1988, according to K. FRÖHLICH (1988). For the following outcrops exist estimations, for the distance between the wells and the presumable infiltration area, informations about the height difference, temperature as well as verbale site descriptions by K. FRÖHLICH (1988) are available. (Continuation see p. 182.)

	Entfernung [m]	Höhenunterschied [m]	verbale Beschreibung	Temperatur [°C]
DN 1	500-800	10-15		3
DN 3	150-200			5
DN 4			in weiter Ebene gelegen	3
DN 5				2
DN 6	40-60			2
DN 8	1000	10		3
DN 10				3
DN 11				2
DN 14				3,5
DN 15				3
DN 16	800-1000	50		5
DN 17				5
DN 18				5
DN 20			Neubildungsgebiet ist ausgedehnte Granithochfläche	
DN 21	2000	50-100		
DS 10			innerhalb eines Granitmassivs, Wassersp. oberlächennah	4
DS 12	1000-2000		in der Nähe eines Granitmassivs	3,5
DS 13				5
DS 14				
DS 16			auf einer Hochebene	2,5
DS 17	200-300	20-30		2
DS 18				4
DS 20				2
U 1				9
U 3	500-750	20-30		8
U 4			vor 1957 gebohrt, damals geringe Förderleistung, die sich nach seismischem Ereignis 1957 spürbar erhöhte	9
U 5			Gneis, devonischer Schiefer in flacher Ebene zwischen Hügelketten	9
U 6	40-60	20-30		9
U 7	5000-10000			8
U 8			gefaßte Auslaufquelle am Fuße eines aus Kalkstein bestehenden Hügels	
U 9			in Umgebung von Brunnen U 7	7
U 10			mitten in der Wüste, nicht in der Nähe von Erhebungen	7

	Entfernung [m]	Höhenunterschied [m]	verbale Beschreibung	Temperatur [°C]
U 11	200	10	inmitten einer flach einfallenden Ebene von ca. 10 km Durchmesser	
U 12				7
U 15				6
U 16				
U 17	2000–3000	40–50	Brunnen nach 2–3 h Förderung „erschöpft“	7
U 19				11
U 20				11
U 21				11
U 22				11
U 23				15,5
U 24	50 100–150	40	unweit des Topbereiches	

5.4. Geologische „Übersichts“karte zu Abschnitt 4.

Figur 51 gibt eine Übersicht über die geologischen Formationen im Aimag Mandalgov und wurde dem NATIONALATLAS DER MVR (1990) entnommen. Für die einzelnen Teiluntersuchungsgebiete liegen – z. T. handgezeichnete – geologische Übersichtskarten vor, deren Maßstab und Qualität eine Verwendung für die Zwecke dieser Arbeit nicht gestatten. Aus diesem Grunde mußte auf deren Wiedergabe verzichtet werden.

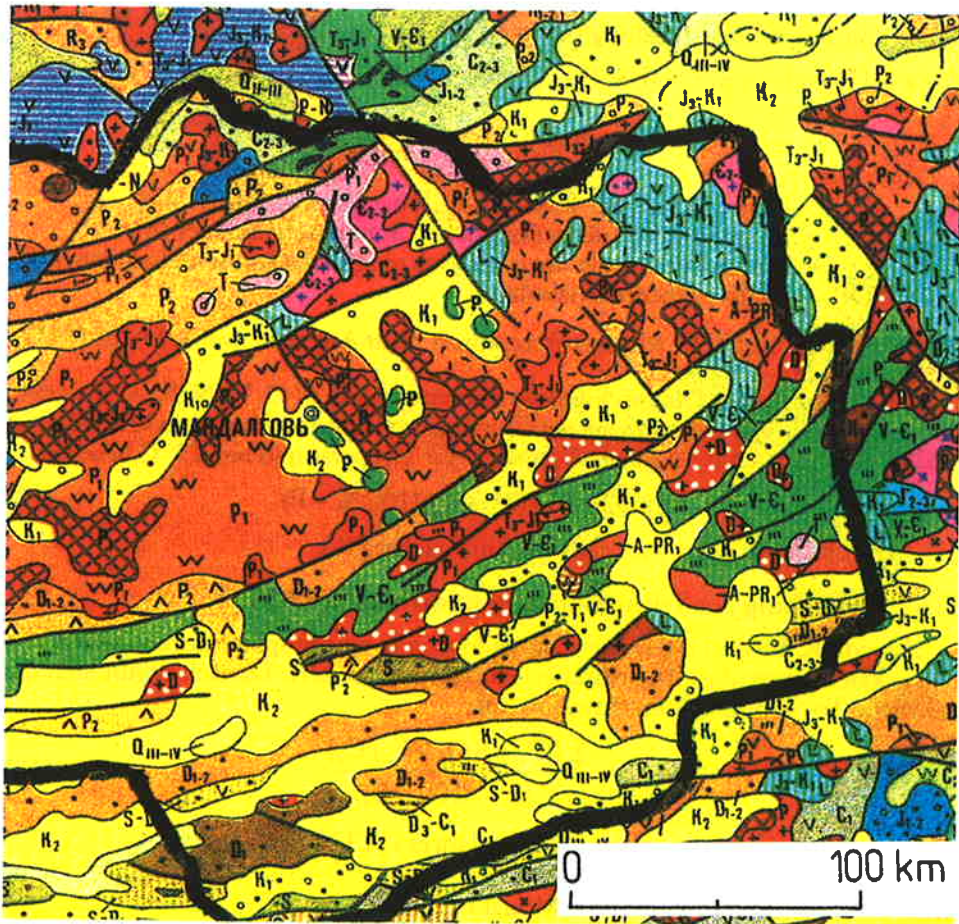


Fig. 51: Geologische Karte des östlichen Teiles des Aimags Mandalgov (MАНДАЛГОВЬ). Darstellung der einzelnen Formationen entsprechend N. ZALEWSKA (1958) bzw. MINISTERIUM FÜR GEOLOGIE (1980). Ein lithologische Beschreibung ist in J. RICHTER (1994), S. 128 ff., nachzuschlagen.
Geologic map of the eastern part of the aimag Mandalgov (MАНДАЛГОВЬ). Presentation of the several formations according to N. ZALEWSKA (1958) and MINISTERIUM FÜR GEOLOGIE (1980), respectively. For lithological description refer J. RICHTER (1994), pp. 128.

5.5. Verwendete Formeln

5.5.1. Berechnung der potentiellen Verdunstung

a) Für Monate mit Durchschnittstemperaturen über 5° C nach L. TURC (1961):

$$E_0 = (R_G + 24) \frac{0,0268 n T}{T + 15} \quad (15)$$

E_0 – potentielle Verdunstung [mm/Monat],

T – Monatsdurchschnittstemperatur [°C],

R_G – mittlere Globalstrahlung [$W m^{-2}$].

R_G wird berechnet mit (vgl. S. DYCK, 1978, S. 329):

$$R_G = R_{RA} (0,21 + 0,61 \frac{SDA}{SDP}) \quad (16)$$

R_{RA} – Monatsmittel der Rayleigh-(Global-)Strahlung [$W m^{-2}$],

SDA – Monatssumme der tatsächlichen Sonnenscheindauer [h],

SDP – Monatssumme der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer [h],

SDA/SDP – relative Sonnenscheindauer.

Werte für R_{RA} und SDP wurden extrapoliert nach Angaben von S. DYCK (1978), S. 246 bzw. 243.

b) Für Monate mit Durchschnittstemperaturen unter 5° C, N. N. IVANOV (1954): Diese empirische Formel wurde auf der Grundlage von Untersuchungen im Valdai-Gebiet (GUS) entwickelt und hat sich insbesondere für Temperaturen bis -25° C bewährt.

$$E_0 = 3,6 \cdot 10^{-5} (25 + T)^2 (100 \% - F) \quad (17)$$

F – Durchschnittswert der relativen Luftfeuchte [%].

5.5.2. Ermittlung der Tritiuminputfunktion nach LEWIS

Die von R. LEWIS (1984) entwickelte Methode wurde später durch zusätzliche Berücksichtigung des oberirdischen Abflusses erweitert. Danach ergibt sich die jährliche Tritiuminputkonzentration mit:

$$C_j = \frac{\sum \{(P_{ji} - RO_{ji} - E_{ji}) C_{ji}\}}{\sum (P_{ji} - RO_{ji} - E_{ji})} \quad (18)$$

C_j – Tritiuminputkonzentration des Jahres j [T.U.],

P_{ji} – Niederschlag im Monat i [mm],

RO_{ji} – oberirdischer Abfluß im Monat i [mm],

E_{ji} – Verdunstung im Monat i [mm].

Zur Bestimmung von E_{ji} wird zunächst die potentielle Verdunstung nach W. HAUDE (1958) berechnet. Mit der Beziehung

$$I_{ji} + \Delta B_{ji} = P_{ji} - RO_{ji} - E_{ji}, \quad (19)$$

mit:

ΔB_{ji} – Bodenwasservorratsänderung im Monat i [mm],

I_{ji} – Infiltration im Monat i [mm],

werden Werte für die monatliche Versickerung bestimmt, wobei die Bilanz der Vormonate (Feuchtedefizit oder Feuchteüberschuß im Boden) berücksichtigt wird.

Für die Zwecke dieser Arbeit wurden die von U. KRÜGER (1989) berechneten Werte übernommen.

5.5.3. Berechnung des Fehlers der Tritiummessung

Die Berechnung des relativen bzw. des absoluten Meßfehlers erfolgte nach U. MORGENSTERN (1992):

$$\frac{\sigma_a}{a} = \left(\left(\frac{\sigma A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\sigma S}{S} \right)^2 + \frac{aAS + 2n_0 + \sqrt{2} t (\sigma \bar{n}_0)^2}{t (aAS)^2} \right)^{1/2} \quad (20)$$

mit:

	Werte für LSC-20	Werte für PC 45
a	- spezifische Probenaktivität	
S	- Eichfaktor	
$\sigma S/S$	1/80 cpm/T.U.	1/61 cpm/T.U.
A	0,01	0,007
A	- Tritiumanreicherung	20
$\sigma A/A$	0,025	45
n_0	- Nulleffektzählrate	0,5
σn_0	1,18	0,036
t	- Meßzeit	1000 min
	1000 min	1000 min

5.6. Abkürzungen, Formelzeichen und Symbole

Symbol	Größe/Parameter	Einheit
Δ	Meßfehler	[Einheit der Meßgröße]
α_x	Jungwasseranteil bei einer Jungwasseraltersgrenze von x Jahren	%
C	Stoffkonzentration	[stoffspezifisch]
C_0	Inputstoffkonzentration	[stoffspezifisch]
$\delta^2\text{H}$	$\frac{(^2\text{H}/\text{H})_{\text{Probe}} - (^2\text{H}/\text{H})_{\text{SMOW}}}{(^2\text{H}/\text{H})_{\text{SMOW}}} \cdot 1000$	%
$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Probe}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} \cdot 1000$	%
D-Ex	Deuterium-Exzeß = $\delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$	%
DM	Dispersionsmodell	
E	Evapotranspiration	m s^{-1}
E_0	potentielle Evapotranspiration	m s^{-1}
EM	Exponentialmodell	
EPM	Exponential-Piston-Flow-Modell in Reihenschaltung	
$g(t')$	Verweilzeitverteilungsfunktion	
h	Abstand von der Sohle des Grundwasserleiters	m
h_0	Mächtigkeit des Grundwasserleiters	m
h_m	grundwassererfüllte Mächtigkeit an der Stelle x_m	m
IAEA	Internationale Atomenergiebehörde	
k	Filtrationskoeffizient	m s^{-1}
n	Porosität	[-]
κ	Evaporationskoeffizient	[-]
λ	Umwandlungskonstante	s^{-1}
LF	spezifische elektrische Leitfähigkeit	$\mu\text{S cm}^{-1}$

MVR	Mongolische Volksrepublik	
Q	Volumenstrom	$m^3 s^{-1}$
	auch flächenbezogen	$m^2 s^{-1}$
Q ₀	Eingangs-Volumenstrom	[siehe Q]
P	Niederschlag	[mm/Zeiteinheit]
PM	Piston-Flow-Modell	
R ₀ , RO	oberirdischer Abfluß	[mm]
SMOW	Standard Mean Ocean Water, Standard zur Angabe des Häufigkeitsverhältnisses von Sauerstoff- und Wasserstoffisotopen	
pmc	percent modern carbon	%
SI	Sättigungsindex	
T	Transmissivität	$m^2 s^{-1}$
TDS	Gesamtmineralisation	mg/l
T.U.	Tritiumeinheit	$1 \text{ } ^3\text{H-Kern}/10^{18} \text{ } ^1\text{H-Kerne}$
	($\hat{=}$ 0,118 Bq/kg Wasser)	
τ	Verweilzeit	s, a
τ_a	Jungwasseraltersgrenze	s, a
$\tau_m, \bar{\tau}$	mittlere Verweilzeit	s, a
v	Geschwindigkeit	$m s^{-1}$
NN	Normalnull	
x	Ortskoordinate	m
z ₀	aufgeschlossene grundwassererfüllte Mächtigkeit	m

zur Kennzeichnung von Teiluntersuchungsgebieten:

DN	Deren
DS	Delgertsogt
G	Gurvansaihan
O	Olgoingobi
M	Mandalgov
Un	Undershill
U	Ulsit

Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein Beitrag zur qualitativen Verbesserung der Auswertung von Umweltnuklidmeßwerten aus Grundwasserproben auf der Grundlage von Lumped Parameter Modellen erbracht.

Als Vorarbeit zur Beantwortung einer Reihe von isotopenhydrogeologischen Fragestellungen wurde eine Softwarelösung erarbeitet, die eine Vielzahl von inhaltlichen, technischen und Bedienungsansprüchen für die Auswertung von entsprechenden Daten berücksichtigt. So wurden erstmals Algorithmen und Verfahren implementiert, die sowohl die Einschätzung der Güte der Modellanpassung als auch die Beurteilung des Einflusses des Meßfehlers auf die Genauigkeit der Grundwasserdatierung gestatten. Es werden gebräuchliche Umwelttracer ebenso berücksichtigt wie neue, anwenderspezifisch eingesetzte Isotope. Das Programm erlaubt die unkomplizierte Anwendung von Modellkopplungen, die die Realität in vielen Fällen besser reflektieren als einfache Modellansätze.

Damit wird dem Hydrogeologen der Praxis ebenso wie dem Wissenschaftler ein Werkzeug in die Hand gegeben, daß wesentlich zur Erleichterung der Anwendung isotopenhydrogeologischer Methoden beiträgt. Der erforderliche Entwicklungs-

aufwand füllte einen großen Teil des Zeitrahmens der vorliegenden Arbeit aus. Die Sinnfälligkeit, diesen Aufwand nicht zu scheuen, bestätigt die ständig zunehmende nationale und internationale Verbreitung des Programmes. Es wurde bereits erfolgreich zur Lösung einer Vielzahl von wissenschaftlichen und praktischen Problemen eingesetzt. Seine Verbreitung wird durch die IAEA gefördert und kommt so vor allem Entwicklungsländern zugute.

Beispielhaft wurden in einzelnen Kapiteln der Arbeit unter Nutzung des erwähnten Computerprogrammes Aspekte der Sensitivität der Grundwasserdatierung in Abhängigkeit von der Ungenauigkeit der Eingangsgrößen, insbesondere der Inputfunktion und des Meßfehlers, behandelt.

Anhand synthetischer Daten wird gezeigt, wie sich unterschiedliche Beschaffenheiten und Mächtigkeiten der Aerationzone auf die Auswertung von Tritiummeßwerten aus dem Grundwasser auswirken. Dabei wird das bislang häufig verwendete Alpha-Konzept einem konzeptionellen Modell gegenübergestellt, das u. a. auf der Verwendung meteorologischer Größen beruht. Es wird deutlich, daß insbesondere bei relativ mächtigen Aerationzonen die Berücksichtigung der Parameter der Aerationzone für eine vertretbare Genauigkeit der Datierung unumgänglich ist. Die Empfindlichkeit des relativen Fehlers der Altersbestimmung steigt dabei im allgemeinen mit der Größe des Meßwertes. Differenzierte Aussagen werden für verschiedene Berechnungsmodelle abgeleitet. Es wird dargestellt, in welchem Maße sich die Aussagegenauigkeit bei der Auswertung von Meßwertreihen gegenüber Einzelmesswerten erhöht. Aus der Größe des Meßfehlers resultieren Lösungsintervalle bestimmter Größe. Unter Berücksichtigung dieser Intervalle sollte als Ergebnis der Grundwasserdatierung nicht der diskrete Wert von Modellparametern angegeben werden, sondern das Feld der Gütefunktion der Modellanpassung.

Einerseits verdeutlichen die Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen einmal mehr die Notwendigkeit der Nutzbarmachung weiterer Umweltisotope zur Grundwasserdatierung. Andererseits können und sollten die vorgestellten Überprüfungen auch auf die Auswertung von Daten anderer Umweltisotope aus Grundwässern übertragen werden, um wichtige zusätzliche Informationen für die Interpretation der Ergebnisse zu gewinnen.

In einem weiteren Kapitel wird die Anwendung von Modellkombinationen für die Auswertung von Daten aus einem humiden Untersuchungsgebiet demonstriert. Bei der Bildung der Tritiuminputfunktion werden meteorologische Größen sowie die Beschaffenheit der Aerationzone quantitativ berücksichtigt. Unter Einbeziehung von hydrologischen Informationen werden vorhandene Modellvorstellungen für ein Heilquellengebiet erweitert bzw. modifiziert. Unter Nutzung der geschaffenen verbesserten Auswertemöglichkeiten gelingt es, die Güte der Modellanpassung zu verbessern. Es werden Abschätzungen für die Anteile unterschiedlicher Grundwasserkomponenten vorgelegt. Als Indikator für die Verletzlichkeit der Quellen gegenüber möglicher anthropogener Schadstoffbelastung werden unter Nutzung der erhaltenen Verweilzeitparameter Jungwasseranteile ermittelt. Schließlich werden Hinweise zum Quellschutz und Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen abgeleitet.

Unter Berücksichtigung der Spezifika eines ariden Untersuchungsgebietes wird untersucht, mit welchem Grad an Genauigkeit Abschätzungen der Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von den verfügbaren geologischen Informationen verbunden sind. Dies betrifft sowohl Kenntnisse, die für die Modellwahl entscheidend sind, als auch die Einschätzung der grundwassererfüllten Mächtigkeit im

Speisungsgebiet. Für das bebrobte Gebiet werden Spannbreiten der Neubildungsgeschwindigkeit unter Einbeziehung der Eingangsgrößen graphisch dargestellt. Die Diskussion der Radiokohlenstoffmeßwerte zeigt zum einen die quantitative Bedeutung des ^{14}C -Anfangsgehaltes für das Datierungsergebnis auf. Zum anderen wird demonstriert, daß die häufig verwendete unspezifizierte Angabe eines „ ^{14}C -Alters“ höchstens in einem relativ kleinen Bereich von etwa 500–2000 a vertretbar ist. Außerhalb dieses Bereiches sind der Einfluß des anthropogenen ^{14}C -Eintrages nach 1953 sowie der Einfluß der vom Auswertemodell reflektierten hydrogeologischen Verhältnisse nicht vernachlässigbar. Somit sollte auch für ^{14}C nicht auf die explizite Angabe des Auswertemodelles bei Datierungsangaben verzichtet werden.

Für die Auswertung der hydrogeochemischen Meßwerte wurde in Entsprechung zur Beschaffenheit des gesammelten Datenmaterials ein Algorithmus aus multivariaten Analysemethoden eingesetzt. Dabei wurden isotopische Merkmale als Indikatoren für mittlere Verweildauer bzw. Verdunstungsbeeinflussung einbezogen. Die gefundenen Ergebnisse lassen für das untersuchte Gebiet u. a. auf folgende allgemeine Zusammenhänge schließen:

1. Den dominierenden Einfluß auf die chemische Zusammensetzung des Grundwassers übt die Aufhärtung der infiltrierten Wässer in einer Front aus Evaporationsrückständen in oberflächennahen Bereichen aus. Die Evaporationsrückstände werden wahrscheinlich vorwiegend bei der Eindunstung meteorischer Wässer von geringergiebigem Niederschlägen akkumuliert.
2. Die damit verbundene Markierung ist von erheblich größerer Bedeutung als die entsprechende Markierung mit ^{18}O und Deuterium.
3. Der beschriebene Prozeß überwiegt andere Vorgänge, welche die hydrogeochemische Entwicklung beeinflussen, wie z. B. eine mögliche Verdunstung an der Grundwasseroberfläche, die Wechselwirkung zwischen Grundwasserleiter und Gesteinsmatrix im Aquifer oder anthropogene Stoffeinträge. Daher ist selbst der Chemismus tiefer Wässer hauptsächlich durch die genannte Aufhärtung determiniert.

Literatur

- BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE & R. WEIBER (1990): Multivariate Analysenmethoden eine anwendungsorientierte Einführung. – Berlin/Heidelberg/New York/London/Paris/Tokio/Hong Kong (Springer-Verlag).
- BAUMGARTNER, A. & H.-J. LIEBSCHER (1990): Lehrbuch der Hydrologie, Bd. 1. Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie. – Berlin/Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
- BEGEMANN, F. & W. LIBBY (1957): Continental water balance, groundwater inventory and storage times, surface ocean mixing rates and world wide water circulation patterns from cosmic-ray and bomb tritium. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, **12**, 227–296.
- BUTTLAR, H. VON & W. F. LIBBY (1955): Natural distribution of cosmic-ray produced tritium, II. – *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **1**, 75–91.
- CHAUSTOV, A. P., G. M. ŠPEJSER, L. A. MINEJEVA et al. (1985): Kislorod-18 v podzemnych vodach MNR // Prirodnye uslovija i resursy nekotorych rajonov Mongolskoj Narodnoj Respubliki. – *Vostočnaja Sibirskaja Pravda*, 88–89. – In: ROMANOV, V. V., D. V. JEFIMOVA, L. S. VLASOVA & S. ZERENDORSCH (1989): Issledovanije podzemnych vod zentralnoj i vostočnoj Mongolii s pomoščju tritija. – *Vodnyje resursy*, **6**, 1989.
- COATS, K. H. & B. D. SMITH (1964): Dead-end pore volume and dispersion in porous media. – *Society of Petroleum, Engineers Journal*, **4**, 73–84.

- CRAIG, H. (1961): Isotopic Variations in Meteoric Water. – *Science*, **133**, 1702–1703.
- DAENECKE, R. (1993): Persönliche Mitteilung. – Wismut GmbH.
- DINÇER, T. & G. H. DAVIS (1967): Some considerations on tritium dating and the estimates of the tritium input functions. – In: I.A.H. Congr., Istanbul, Mem. Int. Assoc. Hydrogeol.
- DONEY, C. S., D. M. GLOVER & W. J. JENKINS (1992): A Model Function of the Global Bomb Tritium Distribution in Precipitation 1960–1986. – *J. Geophys. Res.*, **97**, 5481–5492.
- DUNGER, V. (1989): Erfassung und Modellierung hydrogeologisch relevanter Prozesse in der Aerationzone. – In: *Freiberger Forschungshefte*, C 430, Beiträge zur Methodik und Anwendung hydrogeologischer Forschung, Teil 1, Leipzig (VEB Dt. Verl. für Grundstoffind.).
- DUNGER, V. (1992): Modelling of water and tritium transport in the unsaturated zone. – In: *Isotope Techniques in Water Resources Development 1991*, IAEA, Wien.
- DYCK, S. (1978): *Angewandte Hydrologie*. – Berlin (VEB Verlag für Bauwesen).
- ERIKSSON, E. (1958): The possible use of tritium for estimating groundwater storage. – *Tellus*, **10**, 472–478.
- FONTES, J.-C. & J.-M. GARNIER (1979): Determination of the Initial ^{14}C Activity of the Total Dissolved Carbon: A Review of the Existing Models and a New Approach. – *Water Resour. Res.*, **15**, 399–413.
- FRÖHLICH, K. (1993): Persönliche Mitteilung.
- FRÖHLICH, K. & R. GELLERMANN (1989): Isotopenphysikalische Untersuchungen zur Hydrogeologie und Genese der Quellwässer Bad Brambachs. – In: *Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse*, Bd. 57, H. 1, 58–68, Berlin (Akademie-Verlag).
- FRÖHLICH, K., M. A. GEYH, B. Th. VERHAGEN & K. WIRTH (1987): Isotopenhydrologische Methoden zur Begutachtung von Grundwasser in Trockengebieten. – *Forschungsberichte des Bundesministeriums für Wirtschaftliche Zusammenarbeit*, Bd. 85, München/Köln/London (Weltforum Verlag).
- GAT, J. R. (1992): Monitoring the response of arid zone hydrology to environmental change by means of the stable isotope composition of groundwaters. – In: *Isotope Techniques in Water Resources Development 1991*, IAEA, Wien.
- GELLERMANN, R. & K. FRÖHLICH (1984): Nutzung der Uraniumisotope ^{234}U und ^{238}U in der Hydrologie und Hydrogeologie. – *Freiberger Forschungshefte*, C 397, Leipzig (VEB Dt. Verl. für Grundstoffind.).
- GELLERMANN, R., H. JORDAN, D. HEBERT, K. FRÖHLICH, P. SZYMCAK & N. MEINERT (1990): A concept and isotope method for groundwater vulnerability assessment. – *Isotopenpraxis*, **26**, 561–565.
- GRABCZAK, J., P. MALOSZEWSKI, K. ROZANSKI & A. ZUBER (1984): Estimation of the tritium input function with the aid of stable isotopes. – *Catena*, **11**, 105–114.
- HAUDE, W. (1958): Über die Verwendung verschiedener Klimafaktoren zur Berechnung potentieller Evaporation und Evapotranspiration. – *Meteor. Rsch.*, **11** (3), 96–99.
- HEBERT, D. (1990): Tritium in der Atmosphäre – Quellen, Verteilung, Perspektive. – *Freiberger Forschungshefte*, C 443.
- HIMMELBLAU, D. M. & K. B. BISCHOFF (1968): *Process Analysis and Simulation: Deterministic Systems*. – New York (Wiley & Sons).
- HÖTZL, H., H.-D. SCHULZ & B. HÖLTING (1982): Auswertung hydrochemischer Daten. – *DVWK Schriftenreihe*, **54**, Hamburg/Berlin (Paul Parey).
- IAEA (1990): *Environmental Isotope Data No. 9: World Survey of Isotope Concentration in Precipitation (1984–1987)*. – *Techn. Rep. Ser.*, No. 311, Wien.
- IAEA (1992): *Isotopes in Precipitation*. – PC-Datenbasis des IAEA/WMO-Netzes. – In: IAEA, 1970–1990, *Environmental isotope data 1–9*, *Tech. Rep. Ser.*, Wien.
- ISSAR, A. S., J. R. GAT, A. KARNIELI, R. NATIV & E. MAZOR (1985): Groundwater formation under desert conditions. – In: *Stable and radioactive isotopes in the study of the unsaturated soil zone*, IAEA Technical Document 357, Wien.
- IVANOV, N. N. (1954): Estimation of the amount of evaporation ability. – *Izv. Vsesojuzn. obshch.-va*, **T. 86** (2). – In: DUNGER, V. (1989): Erfassung und Modellierung hydrogeologisch relevanter Prozesse in der Aerationzone. – In: *Freiberger Forschungshefte*, C 430, Beiträge

- zur Methodik und Anwendung hydrogeologischer Forschung, Teil 1, Leipzig (VEB Dt. Verl. für Grundstoffind.).
- JORDAN, H., J. PILOT, M. SCHÖPE & H. SCHULZE (1979): Edelgasisotope in der Hydrogeologie – Ein Beitrag zur Isotopenhydrogeologie. – Freiburger Forschungshefte, C 343, Leipzig (VEB Dt. Verl. für Grundstoffind.).
- JORDAN, H., P. SZYMCZAK & T. ABRAHAM (1991): Gutachten zum Schutz und zur Sanierung der Heilquellen von Bad Brambach. – Unveröff. Bericht, Bergakademie Freiberg.
- KÄMPF, H., K. BRÄUER, U. KOCH, M. MALKOVSKY, G. STRAUCH, F. H. WEINLICH & S. WEISE (1992): Vulkanismus – Mineralwässer – Seismizität im Bereich der Marienbader Störungzone. – In: BANKWITZ, P., H. KÄMPF & E. BIELEFELD (Red.): Exkursionsführer zur 1. Jahrestagung der Gesellschaft für Geowissenschaften e.V. (i.G.), Ges. f. Geowissenschaften e.V., Potsdam.
- KAUFMANN, S. & W. F. LIBBY (1954): The natural distribution of tritium. – Phys. Rev., 93, 1337.
- KOCH, U. (1988): Zum Grundwasserdargebot dreier Einzugsgebiete im Raum Bad Brambach. – Unveröff. Gutachten der Außenstelle der Sächsischen Akademie der Wissenschaften, Bad Brambach.
- KOCH, U. (1993): Persönliche Mitteilung.
- KOCH, U. & W. MICHLER (1991): Nutzung und Schutz von Mineral- und Thermalwässern in der Balneologie am Beispiel der Staatsbäder Bad Brambach. – Z. Physiother., 43, 75–81.
- KRAFT, W. & D. SCHRÄBER (1982): Grundwasserspendenschlüssel und ihre Anwendung bei der Ermittlung des Grundwasserdargebotes im Festgestein-Grundwasserleiter. – Z. angew. Geol., 28, H. 4, 153–161.
- KRAUSE, T., K. FRÖHLICH & D. HEBERT (1979): Isotopenhydrogeologische Untersuchungen am Objekt Salchit, MVR. – Unveröff. Abschlußbericht (1976–1980) der intersektionellen Forschungsgruppe „Isotopenhydrogeologie“, Bergakademie Freiberg.
- KRÜGER, U. (1989): Untersuchungen zur Tritium-Inputfunktion. – Unveröff. Dipl.-Arb., Bergakademie Freiberg.
- LEVIN, I. (1993): Persönliche Mitteilung zu ^{14}C -Messungen im Luft- CO_2 und zu deren Korrektur.
- LEVIN, I., B. KROMER, H. SCHOCH-FISCHER, M. BRUNS, M. MÜNNICH, D. BERDAU, J. C. VOGEL & K. O. MÜNNICH (1985): 25 years of tropospheric ^{14}C observations in central europe. – Radiocarbon, 27, 1–19.
- LEWIS, R. (1984): Beiträge zur Untersuchung und Nutzung von atmosphärischem Tritium. – Unveröff. Diss., Bergakademie Freiberg.
- LOGATCHOV, N. A. (Red., 1989): Posdnij kainozoj Mongolii (Stratigrafija i paleogeografija). – Bd. 47 der Arbeiten der gemeinsamen sowjetisch-mongolischen geologischen Forschungs-expedition, Nauka, Moskau (in Russ.).
- MALOSZEWSKI, P. & A. ZUBER (1982): Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, 1. Models and their applicability. – J. Hydrol., 57, 207–231, Amsterdam.
- MALOSZEWSKI, P. & A. ZUBER (1991): Principles and practice of calibration and validation of mathematical models for the interpretation of environmental tracer data in aquifers. – Unveröff. Manuskript zum „First Coordination Meeting on Mathematical Models for Quantitative Interpretation of Isotope Data in Hydrology“, 18. bis 22. 11. 1991, IAEA, Wien.
- MALOSZEWSKI, P., W. RAUERT, W. STICHLER & A. HERRMANN (1983): Application of flow models in an alpine catchment area using tritium and deuterium data. – J. Hydrology, 33, 319–330, Amsterdam.
- MARINOV, N. A. (1966): Materialy po geologii Mongolskoj Narodnoj Respubliki. – Nedra, Moskau (in Russ.).
- MARINOV, N. A. (verantw. Red., 1970): Stratigrafija i tektonika Mongolskoj Narodnoj Respubliki. Teil 1 der Arbeiten der gemeinsamen sowjetisch-mongolischen geologischen Expedition. – Nedra, Moskau.
- MARINOV, N. A. & V. N. POPOV (1963): Gidrogeologija Mongolskoj Narodnoj Respubliki. – Gostoptechisdat, Moskau (in Russ.).
- MARINOV, N. A., R. A. CHASIN & Č. CHURZ (1977): Geologija Mongolskoj Narodnoj Respubliki, Bd. 1–3, Bd. 3: Bodenschätze. – Nedra, Moskau (in Russ.).

- MATTHESS, G. (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers. – Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 2, Berlin/Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
- MAZOR, E. (1991): Applied chemical and isotopic groundwater hydrology. – Buckingham (Open University Press).
- MICHLER, W. (1973): Beiträge zur Hydrogeologie des Oberen Vogtlandes unter besonderer Berücksichtigung der Mineralquellen. – Unveröff. Diss., Martin-Luther-Universität Halle/Wittenberg.
- MINISTERIUM FÜR GEOLOGIE (1980): TGL 25 234/05, Fachbereichstandard Geologie – Stratigraphie: Symbole der stratigraphischen Einheiten. – Berlin.
- MORGENSTERN, U. (1992): Isotopenanreicherungen – Beiträge zur Erweiterung des Anwendungsbereiches der Tritium- und der ^{14}C -Methode. – Unveröff. Diss., Freiberg.
- MORGENSTERN, U., D. HEBERT & W. STOLZ (1992): Electrolytic tritium enrichment of natural water samples for tritium analysis. – In: NOAKES, J. E., F. SCHÖNHOFER & H. A. POLACH (Eds., 1992): Liquid scintillation spectrometry 1992. – Proc. Int. Conf. 14.–18. 9. 92, Wien. – Radiocarbon, 1993, Tulson/Arizona.
- MOSER, H. & W. RAUERT (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. – Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 8, Berlin/Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
- NATIONALATLAS DER MVR (1990): „Bugd Nairamdach Mongol ARD ULS Undesni Atlas“. – Gemeinschaftsprojekt mongolischer und sowjetischer Behörden und wissenschaftlicher Einrichtungen, Ulan-Bator/Moskau (nur in Mongolisch).
- NORUŠIS, M. (1990): SPSS/PC+ – Advanced Statistics™ 4.0. – SPSS Inc., Chicago.
- PARKHURST, D. L., D. C. THORSTENSON & L. N. PLUMMER (1980): PHREEQE – a computer program for geochemical calculations. – US Geol. Surv. Water Resources Inv., 80–96, Washington D.C.
- PINNEKER, E. V. (1980): Geochimija podzemnych mineralnych vod Mongolskoj Narodnoj Respubliki. – Nauka, Sibirische Abteilung, Novosibirsk (in Russ.).
- PINNEKER, E. V., B. I. PISARSKI, S. E. PAVLOVA & W. S. LEPIN (1991): Isotope Zusammensetzung der Mineralwässer der Mongolei. – Isotopenpraxis, 28, 313–320.
- PISARSKIJ, B. I. & G. LCHAN-AASUREN (Red., 1983): Karta mineralnych vod MNR. 1 : 2 500 000. – Ulan-Bator (in Russ.).
- RICHTER, J. (1994): Methodische und regionale Beiträge zur Auswertung von Umweltisotopendaten in der Hydrogeologie. – Unveröff. Diss., Erzherzog-Johann-Univ., Graz.
- RICHTER, J. & P. SZYMCZAK (1992): MULTIS. Ein Computerprogramm zur Auswertung isotopenhydrogeologischer Daten auf der Grundlage gekoppelter konzeptioneller Boxmodelle. – Bergakademie Freiberg, Lst. f. Hydrogeologie.
- RICHTER, J. & P. SZYMCZAK (1992): MULTIS. A computer program for the interpretation of isotope hydrogeology data based on combined lumped parameter models. – Bergakademie Freiberg, Lst.f.Hydrogeologie. (Erhältlich über Bibliothek der Bergakademie bzw. Section of Isotope Hydrology der IAEA.)
- RICHTER, J., P. SZYMCZAK & H. JORDAN (1992): A computer program for the interpretation of isotope hydrogeologic data. – In: HÖTZL, H. & A. WERNER (Hrsg.): Tracer Hydrology. – Rotterdam/Brookfield (Balkema).
- RICHTER, J., P. SZYMCZAK, T. ABRAHAM & H. JORDAN (1993): Use of combinations of lumped parameter models to interpret groundwater isotopic data. – Journal of Contaminant Hydrology, 14, 1–13.
- ROBERTSON, W. D. & J. A. CHERRY (1989): Tritium as an Indicator of Recharge and Dispersion in a Groundwater System in Central Ontario. – Water Resour. Res., 27, 1097–1109.
- ROMANOV, V. V., D. V. JEFIMOVA, L. S. VLASOVA & S. ZERENDORSCH (1989): Issledowanije podzemnych vod zentralnoj i vostočnoj Mongolii s pomoščju tritija. – Vodnyje resursy, 6, 1989.
- SANJDORJ, S. (1993): Persönliche Mitteilung.
- SCHRÄBER, D. & P. SZYMCZAK (1984): Zur Ermittlung des Basisabflusses und der Abschätzung dränabler Kluftvolumina aus Quellschüttungsmessungen in Festgesteinen. – Z. angew. Geol., Bd. 80, H. 3, 135–139.
- SEEWETTERAMT HAMBURG (1993): Unveröffentlichte Mitteilungen zu Klimaangaben der Mongolischen Volksrepublik. – Bearbeiter: Nawrazala, HAK Potsdam.

- SONNTAG, C., D. CHRISTMAN & K. O. MÜNNICH (1985): Laboratory and field experiments on infiltration and evaporation of soil water by means of deuterium and oxygen-18. – In: Stable and radioactive isotopes in the study of the unsaturated soil zone. – IAEA-TECDOC 357, Wien.
- SPERLING, B. & B. MERKEL (1992): Modellierung geogener Grundwasserbeschaffenheit am Beispiel des fränkischen Keupers. – DVWK Schriftenreihe, 31, 201–320, Hamburg/Berlin (Verlag Paul Parey).
- STUMM, A. (1993): Komplexe hydrogeologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Mineralquellen Bad Brambach. – Unveröff. Dipl.-Arb., Bergakademie Freiberg.
- SZYMCZAK, P., T. ABRAHAM & S. MAUDER (1992): Ergebnisbericht Pumpversuchsauswertung für die obere Grenzquelle. – Unveröff. Bericht, Bergakademie Freiberg.
- TANS, T. T. (1981): A compilation of bomb ^{14}C data for use in global carbon model calculations. – In: BOLIN, B. (Hrsg.): Carbon Cycle Modelling. – Scope 16, Chichester (Wiley & Sons).
- TURC, L. (1961): Evaluation des besoins en eau d'irrigation évapotranspiration potentielle. – Ann. Agron., 12, 13. – Zitiert aus: DYCK, S. (1978): Angewandte Hydrologie. – Berlin (VEB Verlag für Bauwesen).
- WATZNAUER, A. & U. KOCH (1989): Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Quellgebiet von Bad Brambach. – In: Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, Bd. 57, H. 1, 49–58, Berlin (Akademie-Verlag).
- WEBER, W. (Red. eines Autorenkollektivs, 1988): Bericht einer geologischen Exkursion durch die Mongolische Volksrepublik. – Unveröff. Bericht, Bergakademie Freiberg.
- WEINLICH, F., K. BRÄUER, H. KÄMPF, G. STRAUCH & S. WEISE (1993): Mantel-Kruste Wechselwirkung im Bereich der Marienbader Störungszone. Teil 2: Gasgeochemische Untersuchungen an Mineralquellen entlang eines Profils über das Eger-Rift. – Z. geol. Wiss., 11 (1/2), 135–142.
- WILHELM, F. (1987): Hydrogeographie: Grundlagen der allgemeinen Hydrogeographie. – Braunschweig (Höller und Zwick).
- YOUSFI, M., J. F. ARANYOSSY, B. DJERMOUNI & J.-Ch. FONTES (1985): Étude isotopique des mouvements de l'eau en zone non saturée sous climat aride (Algérie). – In: Stable and radioactive isotopes in the study of the unsaturated soil zone, IAEA-TECDOC 357, Wien.
- YURITSEVER, Y. & S. BLAPENG (1992): Compartmental modelling approach for simulation of spatial isotopic variations in the study of groundwater dynamics. – In: Isotope Techniques in Water Resources Development 1991, IAEA, Vienna.
- ZALEWSKA, N. (Red., 1958): Instruktion über die Zusammenstellung und Drucklegung geologischer Karten und Lagerstätten Karten im Maßstab 1:200 000. RGW-Richtlinie (in russ. und deutsch). – 114 S., 16 Anl. – Wydawnictwa geologiczne, Warschau.
- ZUBER, A. (1985): Review of existing mathematical models for interpretation of tracer data in hydrology. – Institut Fiziki Jadowej, Raport No 1270/AP, Krakow.
- ZUBER, A. (1986): Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems. – In: FRITZ, P. & J. Ch. FONTES (Hrsg.): Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 2, Amsterdam.

Summary

The work deals with the interpretation of environmental isotope data from groundwater samples based on lumped parameter models. The sensitivity of groundwater age dating versus accuracy of primary data, in particular, the influences of the measurement error and the input function are investigated. Detailed considerations are dedicated to tritium. Several approaches for the determination of the input function are compared and evaluated, e.g. the classic weighting of tritium input concentration by amounts of precipitation and conceptual models which take into account the properties of the unsaturated zone. In conclusion, it is recommended to consider the error of measurement, the field of deviations of the model calibration and the relations in the unsaturated zone in the interpretation of environmental isotope data. The programed computer software

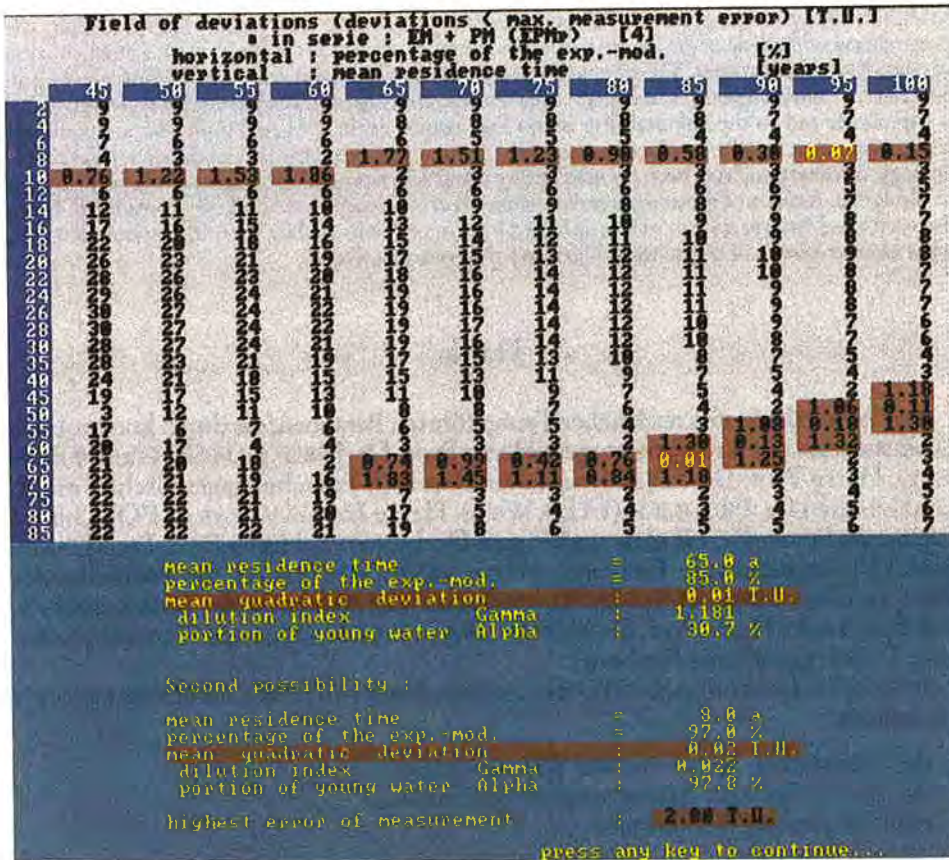
MULTIS allows among others the combination of models for routine interpretation, the presentation of the field of deviations in model calibration as well as the simultaneous interpretation of data of several isotopes. The improved possibilities of interpretation are demonstrated upon data from a humid region in Germany. Conclusions referring to fractions of several ground water components and to the vulnerability of springs against anthropogenic pollution are deduced. Inaccuracies that may be involved in estimating groundwater recharge, depending on the available geologic information, have been pointed out by using data from the arid region of the Gobi desert in Mongolia. Aspects of groundwater dating based on radiocarbon are critically considered. From the combined interpretation of isotopic and hydrogeochemical data by multivariate methods, basic characteristics of the genesis of ground waters are derived.

Dank

Der Autor dankt den nachstehend aufgeführten Personen, die durch konstruktive Diskussionen zur Arbeit beitragen: Herrn Prof. Dr. JORDAN (HGC GmbH Freiberg), Herrn Prof. Dr. ZOJER (Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Graz), Herrn Dr. FRÖHLICH (IAEA Wien), Herrn Dr. SZYMCZAK (GEOS GmbH Freiberg), Herrn Dr. HEBERT und Herrn Dr. DUNGER, Herrn Prof. Dr. MERKEL (alle TU Bergakademie Freiberg), Herrn SANJDORJ (Institut für Probleme des Wassers, Ulan-Bator), Herrn Dr. KOCH (Sächsische Akademie der Wissenschaften, Bad Brambach), Herrn Prof. Dr. MÖNCH, Herrn Prof. Dr. PILZ und Herrn Dr. KÜHL (alle TU Bergakademie Freiberg).

Folgenden Institutionen ist für die Bereitstellung von Daten und Informationen zu danken:

- der Sächsischen Akademie der Wissenschaften,
- der Internationalen Atomenergie-Organisation,
- dem Deutschen Wetterdienst.

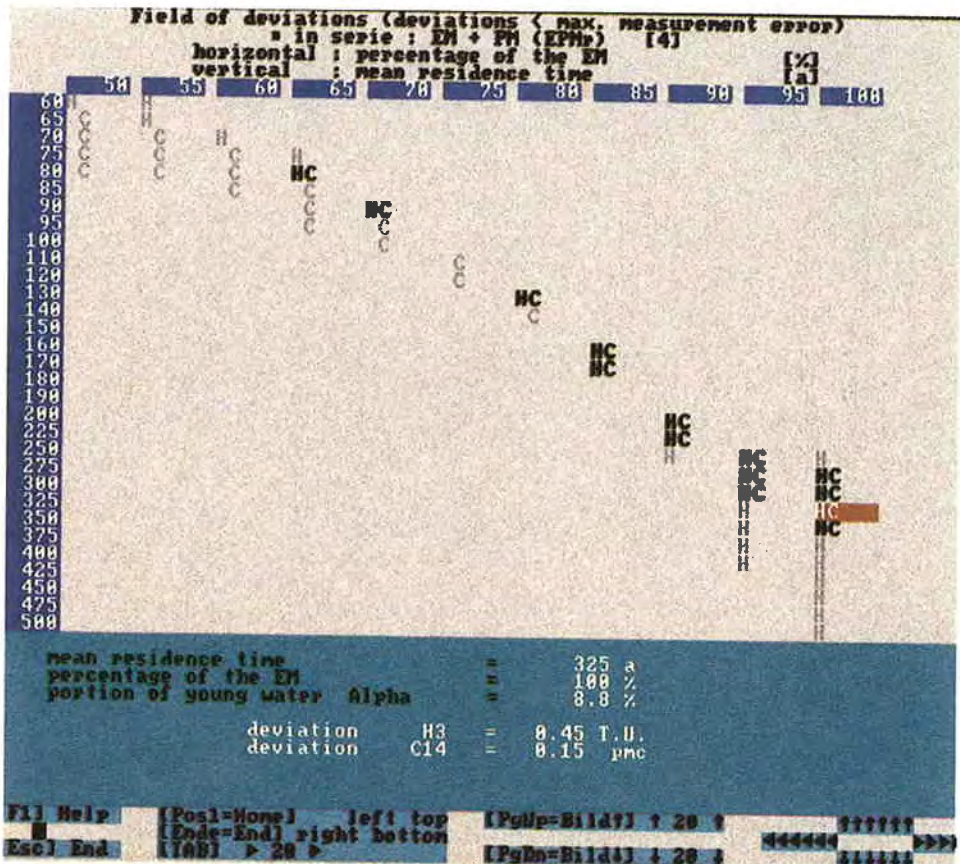


Tafel 1: Darstellung der Güte der Modellkalibrierung für verschiedene Parameterwerte (Gütefunktion) – Bildschirmdarstellung des Programmes MULTIS.

- 5. Zeile von oben und erste Spalte links: Werte der zu fittenden Modellparameter;
- Zahlenfeld im Zentrum: mittlere quadratische Abweichungen der Meßwerte vom Modelloutput für die jeweils entsprechenden Modellparameter (1. Spalte, 5. Zeile);
- im Zahlenfeld dunkel hinterlegte Felder: Abweichungen, die kleiner als der größte Meßfehler sind; innerhalb des dunkel hinterlegten Bereiches helle Zahlen (0.01, 0.07): Felder die den ermittelten diskreten Lösungen am nächsten liegen;
- unten: für zwei diskrete Lösungen Modellparameter, Jungwasseranteile.

Presentation of the results of model calibration for several parameter values (field of deviations) – screen of the program MULTIS.

- 5th row and first column: values of model parameters ought to be fit;
- field in the middle : mean quadratic deviations of the measured values from model output for respective corresponding model parameters (1st column, 5th row);
- dark shaded fields: deviations lower than the highest measurement error; light figures within the dark range (0.01, 0.07): fields next to the discrete values of the fitted solution;
- down: model parameters and young water portions for two discrete solutions.



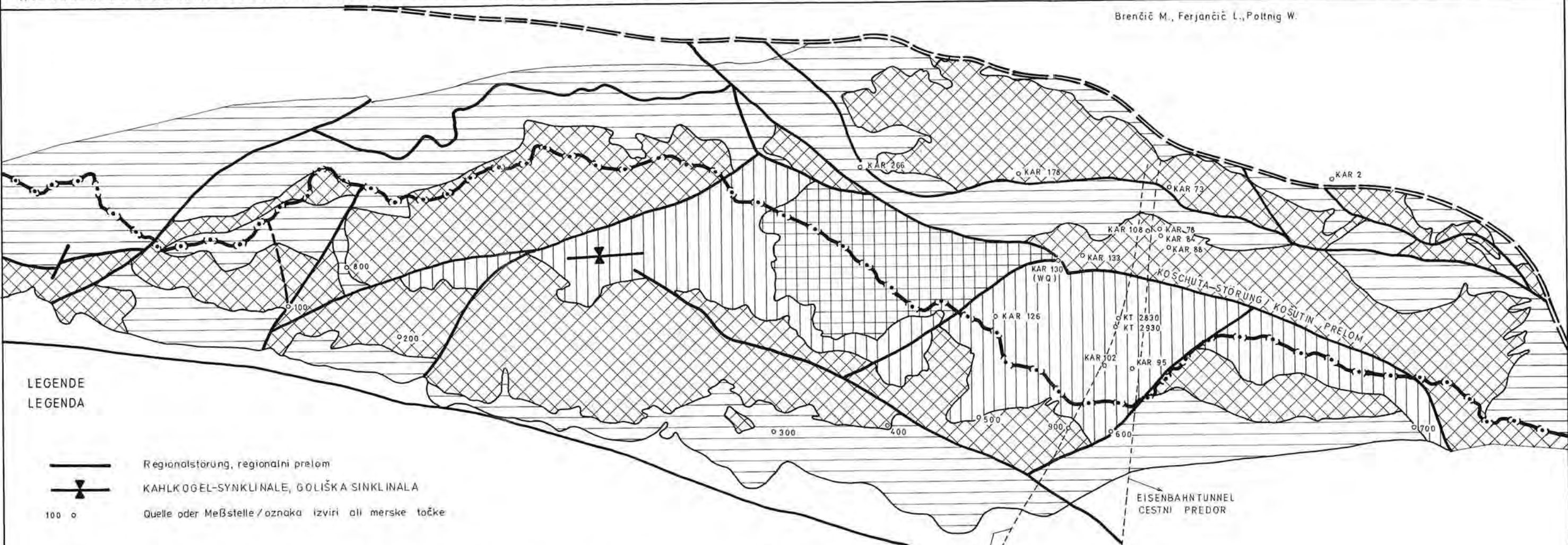
Tafel 2: Darstellung der Lösung der indirekten Aufgabe für die gleichzeitige Auswertung mehrerer Tracer in MULTIS.

- 5. Zeile von oben und 1. Spalte links: Werte der zu fittenden Modellparameter;
- Feld im Zentrum: Für mit Buchstaben markierte Felder ist die mittlere quadratische Abweichung der Meßwerte vom Modelloutput für die jeweils entsprechenden Modellparameter (1. Spalte, 5. Zeile) kleiner als der größte Meßfehler: „C“ für ¹⁴C und „H“ für ³H.

Presentation of the solution of the inverse problem for the simultaneous interpretation of several tracers in MULTIS.

- 5th row and 1st column: values of model parameters ought to be fit;
- field in the middle: The mean quadratic deviation of measured values from model output is lower than the highest measurement error in the marked fields for the corresponding parameters (1st column, 5th row): “C”-¹⁴C and “H”-³H.

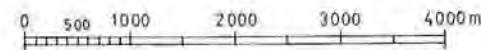
Brenčič M., Ferjančič L., Poltnig W.



LEGENDE
LEGENDA

- Regionalstörung, regionalni prelom
- KAHLKOGEL-SYNKLINALE, GOLIŠKA SINKLINALA
- 100 o Quelle oder Meßstelle / oznaka izviri ali merske točke

- wasserstauende Schichten mit vorwiegend Oberflächenabfluß, (Hochwipfelschichten - Werfener Schichten) / vodoneprepustni, prevladuje površinski odtok; (Hochwipfelske plasti - werfen)
- Oberflächenabfluß, stellenweise lokale Kluffaquifere in Kalken (Raibler Schichten, Hornsteinplattenkalk) / Površinski odtok, mestoma lokalni razpoklinski vodonosniki (Raibelske plasti, roženci, apnenca z roženci) /
- Kluffaquifer kleinklüftiger Sarl- und Schlerndolomit / Razpoklinski vodonosnik, drobno razpokan sarlski in schlernski dolomit
- Verkarsteter Kluffaquifer (Wechselfolge von Dachsteinkalk und dolomit) / Kraško razpoklinski vodonosnik (menjavanje dachsteinskega apnenca in dolomita)

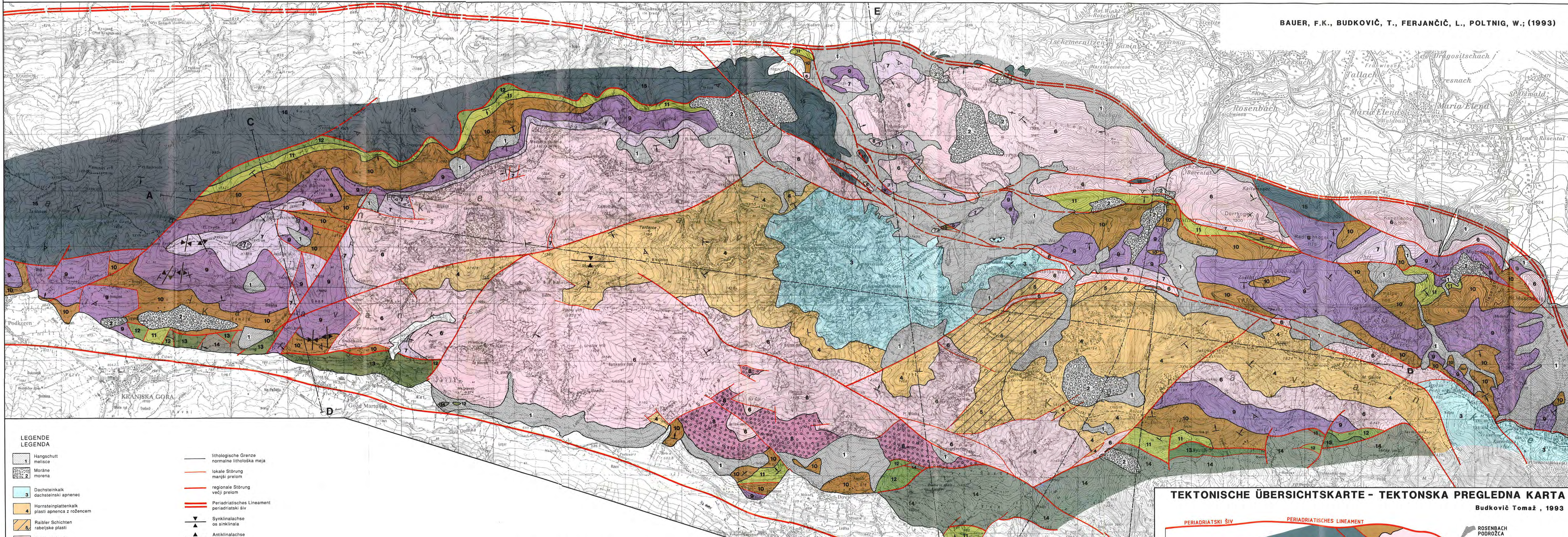


EISENBAHTUNNEL
CESTNI PREDOR

AUTOBAHTUNNEL
CESTNI PREDOR

AUFTRAGGEBER AMT DER KÄRNTNER LANDESREGIERUNG
NAROČNIK: MINISTERSTVO ZA VARSTVO OKOLJA IN UREJANJE
PROSTORA

BAUER, F.K., BUDKOVIČ, T., FERJANČIČ, L., POLTNIČ, W.; (1993)

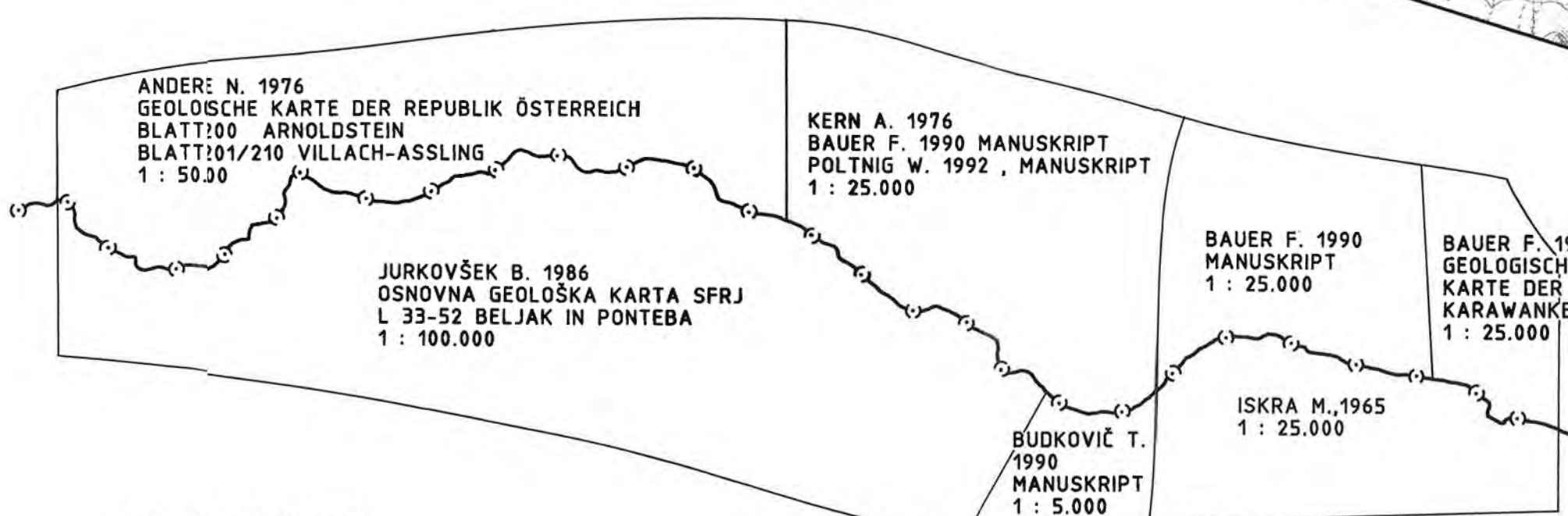


- LEGENDE**
LEGENDA
- 1 Hangschutt
mellice
 - 2 Moräne
morena
 - 3 Dachsteinkalk
dachsteinski apnec
 - 4 Hornsteinplattenkalk
plasti apnenca z rožencem
 - 5 Raibler Schichten
raibelske plasti
 - 6 Schlerndolomit
schlerski dolomit
 - 7 Buchensteiner Schichten
buchensteinske plasti
 - 8 Uggowitzer Brekzie
ukovška breča
 - 9 Saridolomit
sariski dolomit
 - 10 Werfener Schichten
werfenske plasti
 - 11 Bellerophonolomit
belerofonski dolomit
 - 12 Grödenner Schichten
grödenska formacija
 - 13 Trogkofelkalk
trokofelski apnec
 - 14 Auernigschichten
javorniške plasti
 - 15 Hochwipfelschichten + tekt.
hochwipfelske plasti + tektonske leče devonskega apnenca

- lithologische Grenze
normalne lithološka meja
- lokale Störung
manjši prelom
- regionale Störung
večji prelom
- Periadriatisches Lineament
periadriatski šiv
- ▼ Synkinalachse
os sinkinala
- ▲ Antikinalachse
os antikinala

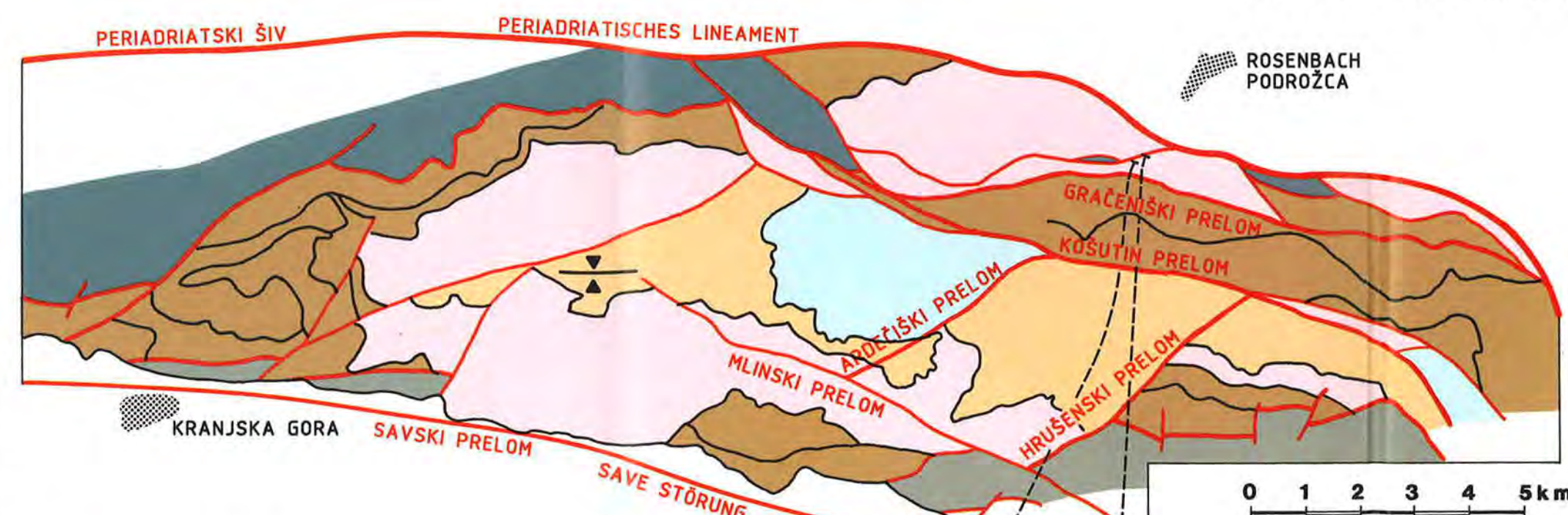
- Einfallen der Schichten
vpad plasti
- + 0° - 9°
 - + 10° - 29°
 - + 30° - 59°
 - + 60° - 80°
 - + 81° - 90°

**VERTEILUNG DER AUFNAHMEGEBIETE
RAZDELJEV KARTIRANEGA OBMOČJA PO AVTORJIH**

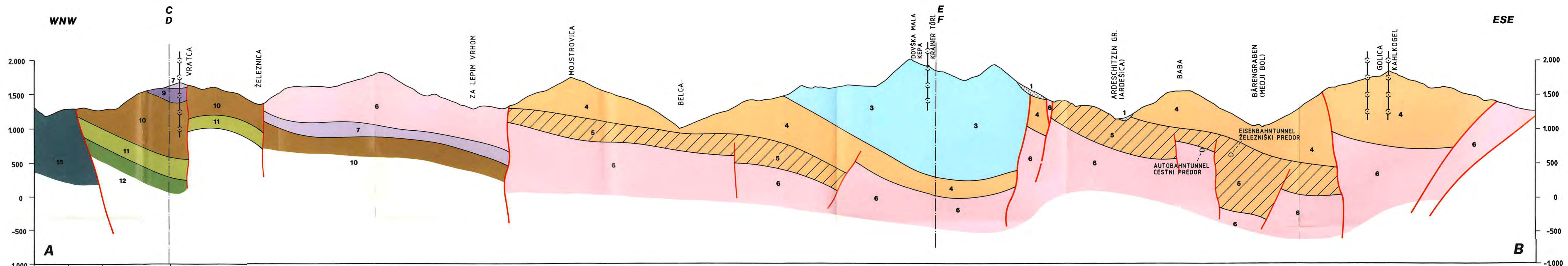


TEKTONISCHE ÜBERSICHTSKARTE - TEKTONSKA PREGLEDNA KARTA

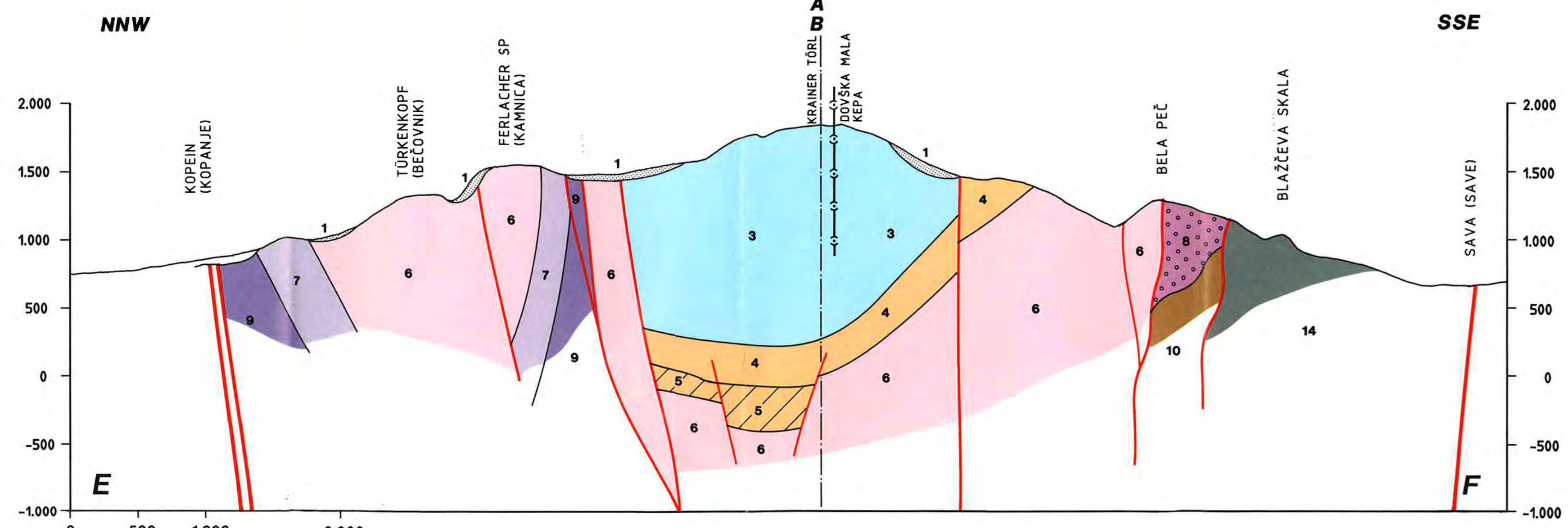
Budkovič Tomaž, 1993



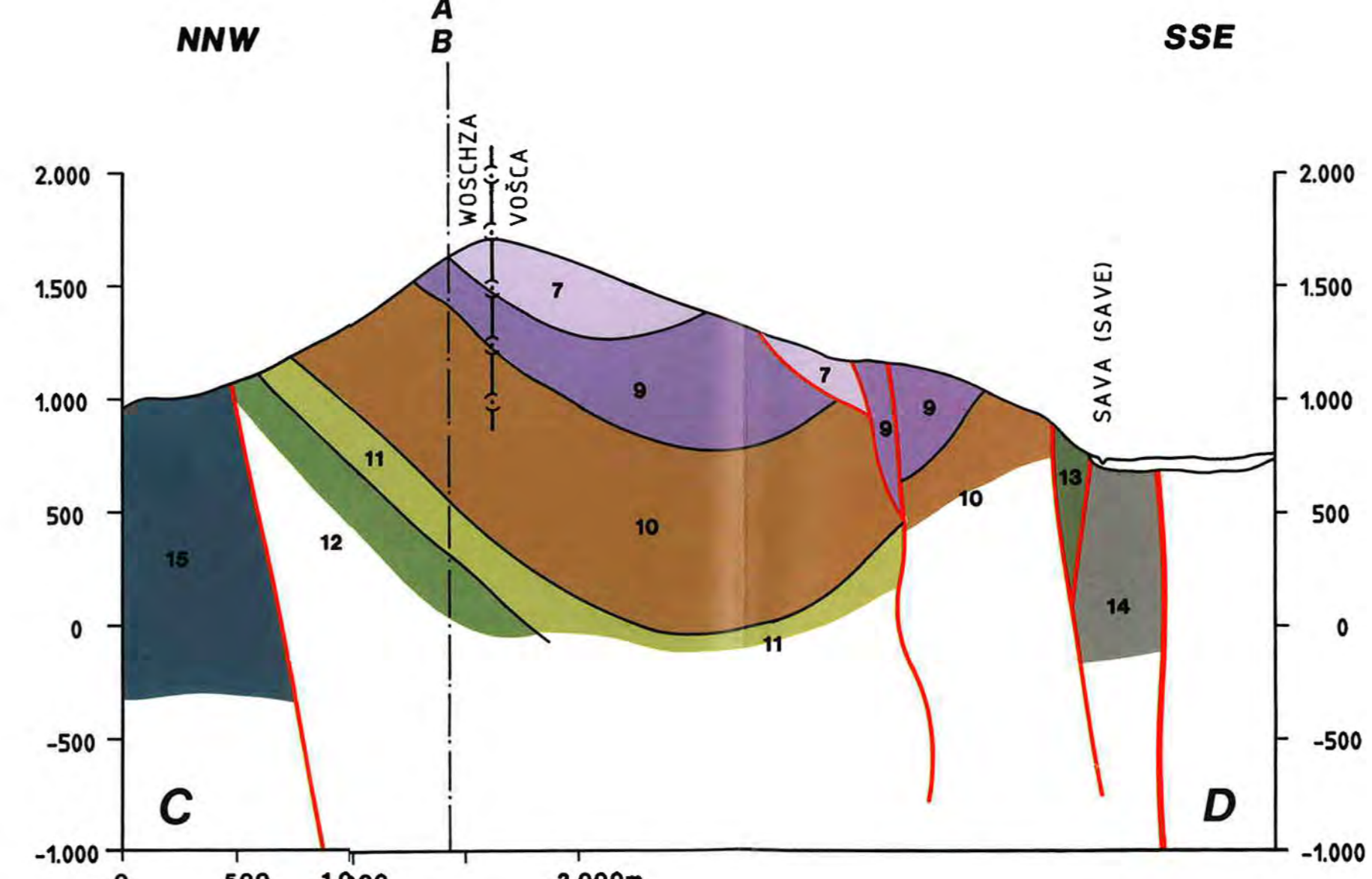
- Lokalstörung, lokální prelom
- Regionalstörung, regionalni prelom
- ▼ KAHLKOGEL SYNKINALA, GOLISKA SINKINALA
- ▲ AUERNIGSCHICHTEN JAVORNISKE PLASTI
- JUNGPALEOZOIKUM DER SÜDKARAWANKEN
MLAJŠI PALEOZOIK JUŽNIH KARAVANK
- HOCHWIPFELSCHICHTEN HOCHWIPFELSKE PLASTI
- ALTPALEOZOIKUM DER WESTKARAWANKEN
STAREJŠI PALEOZOIK ZAHODNIH KARAVANK



M. 1 : 25.000



M. 1 : 25.000



M. 1 : 25.000

LEGENDE
LEGENDA

	Hangschutt melisse		lithologische Grenze normale lithološka meja
	Moräne		lokale Störung
	Dachsteinkalk dachsteinski apnec		lokale Störung manjši prelom
	Hornsteinplattenkalk plasti apnenca z rožencem		regionale Störung
	Raibler Schichten rabeljske plasti		regionale Störung večji prelom
	Schlierndolomit schlierski dolomit		Periadriatisches Lineament periadriatski siv
	Buchensteiner Schichten buchensteinske plasti		
	Uggowitzer Brekzie ukovška breča		
	Saridolomit sariski dolomit		
	Werfener Schichten werfenske plasti		
	Bellerophonolomit belerofonski dolomit		
	Grödener Schichten grödenska formacija		
	Trogkofelkalk trogkofelski apnec		
	Auernigschichten javorniške plasti		
	Hochwipfelschichten + tekt. devonische Linsen		hochwipfelske plasti + tektonske leče devonskega apnenca