

Isotopenhydrologische Untersuchungen von Grund- und Quellwässern im Raum Innsbruck

Isotope-hydrological investigations of ground- and surfacewaters in the Innsbruck region

M. FORSTER¹⁾ & S. M. WEISE²⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	49
2. Untersuchungsgebiet und Methodik.....	50
3. Ergebnisse.....	52
3.1. Untersuchung der Quellwässer des Bereiches Mühlau.....	52
3.2. Untersuchung der Grundwässer aus den Tiefbrunnen der Talfüllung....	55
4. Klassifizierung der Grundwässer.....	58
4.1. Höhenlage des Einzugsgebietes.....	58
4.2. Altersmäßige Klassifizierung und Fließverhalten.....	59
4.2.1. Bereich Mühlau.....	60
4.2.2. Grundwässer des Talbereiches.....	60
Zusammenfassung.....	65
Literatur.....	66
Summary.....	66
Dank.....	66

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten sind eine Vielzahl von Isotopenmethoden entwickelt worden, die als wirkungsvolle Werkzeuge für die Bewältigung der Aufgaben Ressourcenmanagement und Qualitätssicherung von Grund- und Oberflächenwasservorkommen Einsatz finden (vgl. z. B. H. MOSER & W. RAUERT, 1980, P. FRITZ & J.-Ch. FONTES, 1980, 1986). Die vorliegende Arbeit behandelt isotopenhydrologische Untersuchungen an tiefliegenden und oberflächennahen Grundwässern sowie an Quellwässern im Bereich Innsbruck, die von der Hydroisotop GmbH in der Zeit von Oktober 1992 bis Oktober 1993 mit dem Ziel durchgeführt worden waren, die Wasserqualität nicht genutzter Grund- und Oberflächenwasservorkommen zu analysieren

¹⁾ Dr. M. FORSTER, Hydroisotop GmbH, Woelkestraße 9, D-85301 Schweitenkirchen.

²⁾ Dr. S. M. WEISE, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Hydrologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 Neuherberg.

und im Sinne einer Qualitätssicherung genutzte Trinkwasservorkommen zu prüfen. Zur Frage der Herkunft sollten die Grund- und Oberflächenwässer nach ihrer isotopischen Signatur hinsichtlich der stabilen Isotope Sauerstoff-18 (^{18}O) und Deuterium (^2H) charakterisiert werden. Desweiteren sollten zusätzlich aus den Gehalten an den radioaktiven Isotopen Tritium (^3H) und Kohlenstoff-14 (^{14}C) Aussagen zur mittleren Verweilzeit (MVZ) der untersuchten Grund- und Quellwässer abgeleitet werden, um Hinweise auf den Grad der „Geschütztheit“ abzuleiten.

Aus früheren Untersuchungen vom Institut für Hydrologie (ehemals Radiohydro-metrie) der GSF Neuherberg und vom Arsenal (Wien) lagen bereits Meßwerte von Isotopgehalten vor. Besonderes Interesse bestand an dem Vergleich der vor immerhin 10 Jahren über einen mehrjährigen Zeitraum untersuchten Tritiumgehalte einiger Grundwässer mit den Ergebnissen der Jahre 1992/93. In Verbindung mit den neuerlichen Resultaten sollte hierbei versucht werden, Hinweise auf das Strömungsverhalten der untersuchten Grundwässer zu erhalten. Im folgenden findet sich eine Zusammenfassung des umfangreicheren Projektberichtes der Fa. Hydroisotop GmbH, die um die Darstellung der Heliumisotopenergebnisse (^3He , ^4He ; GSF-Institut für Hydrologie) ergänzt wurde.

2. Untersuchungsgebiet und Methodik

Die im Bereich Innsbruck erschlossenen Grundwasservorkommen befinden sich an der Nahtstelle großer tektonischer Baueinheiten der Ostalpen. Das Einzugsgebiet der nördlich von Innsbruck gelegenen Quellen reicht auf große Teile des Karwendelgebirges (Nördliche Kalkalpen) bzw. auf den Übergangsbereich (Hang zum Inntal) zurück. Die hier anstehenden Gesteine sind dem triadischen Sedimentationszyklus der Nördlichen Kalkalpen zuzuordnen und tektonisch in kleinere Einheiten zergliedert.

Die Mühlauer Quellen (Nr. 1–4 in Fig. 1), die über ein Stollensystem gefaßt sind, wurden direkt an den einzelnen Quellaustritten „Rumerstollen 1. Abzweigung“ und „Rumerstollen 2. Abzweigung“ bzw. Quellgruppe „Rumerstollen S“ (Nr. 2) sowie „Klamm-bachstollen“ (Nr. 3; Quellaustritt bei Station 280 m) und „Wurmbachstollen“ (Nr. 4; Quellaustritt bei Station 280 m) beprobt. Weiterhin wurden Beprobungen des Mühlauer Baches an der Entnahmestelle „Schweinsbrücke“ durchgeführt.

Das Inntal markiert ein tiefgreifendes Störungssystem, welches das Kalkalpin im N von den metamorph überprägten Einheiten im S trennt. Die im Talbereich des Inn liegenden Tiefbrunnen (in Fig. 1 Nr. 5: TB 1, Nr. 6: V1 sowie Nr. 7: TB 2) erschließen Grundwasservorkommen in den Verfüllungen dieses Störungssystems. Die Brunnen konnten direkt über Unterwasserpumpen beprobt werden. Ein längeres „Freipumpen“ der Bohrung TB 1 war nicht möglich, da sie wegen geringer Ergiebigkeit rasch trockenfiel. Über einen Kurzpumpversuch am Brunnen TB 2 nach einwöchigem Stillstand wurde geprüft, ob unterschiedliche hydraulische Bedingungen im Grundwasserströmungsfeld einen Einfluß auf den Isotopengehalt des Grundwassers haben.

An den Grund- bzw. Oberflächenwässern der Entnahmestellen wurden zur „Altersbestimmung“ die ^3H -, ^2H - und ^{18}O -Gehalte analysiert. Die Quell- und Oberflächenwässer wurden mit der „ ^{18}O -Methode“ auf den Zufluß einer schnell infiltrierenden Komponente untersucht. Zum Vergleich konnten Ergebnisse früherer ^3H -Probenahmeserien sowie für Grundwässer im Talbereich solche einzelner Heliumisotopenproben hinzugezogen werden. In den Grundwässern des Talbereiches wurden die ^{14}C -Gehalte des im Grundwasser gelösten anorganischen Kohlenstoffs (DIC:

Dissolved Inorganic Carbon) bestimmt, um die dort vermutete, relativ alte Grundwasserkomponente zu datieren. Im Grundwasser der Entnahmestelle TB 1 konnte der ^{14}C -Gehalt nicht bestimmt werden, da die Wassernachlieferung während der Probenahme zu gering war bzw. eine Kontamination mit „jungem“ Grundwasser zu befürchten gewesen wäre.

Während an dieser Stelle hinsichtlich der Meßtechnik und Interpretationsmethodik für $^2\text{H}/^{18}\text{O}$, ^3H und $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ auf die Literatur verwiesen wird (H. MOSER & W. RAUERT, 1980), soll auf jene für $^3\text{He}/^4\text{He}$ kurz eingegangen werden (S. M. WEISE & H. MOSER, 1987).

Helium ist ein in der Atmosphäre mit einem Anteil von rund 5 ppm vorkommender Spurenstoff. Das Häufigkeitsverhältnis der beiden stabilen Isotope des Heliums, ^3He und ^4He , beträgt dort etwa $1,4 \times 10^{-6}$. Im Niederschlagswasser lösen sich sehr kleine Mengen Helium. Dieses gelöste Helium wird im Grundwasser zumeist um Anteile erhöht, die im Wasser selbst (^3He : durch radioaktiven Zerfall aus meteorischem Tritium = $^3\text{He}_{\text{tritogen}}$) und im Gestein (^4He : durch radioaktiven Zerfall von Uranium und Thorium einschließlich radioaktiver Tochterprodukte = $^4\text{He}_{\text{Gestein}}$; ^3He : aus Kernreaktionen von Neutronen des natürlichen Neutronenflusses mit $^6\text{Li} = ^3\text{He}_{\text{Gestein}}$) entstehen. Während die Entstehung von ^3He aus meteorischem Tritium ($^3\text{He}_{\text{tritogen}}$) in einer dem Tritiumzerfall entsprechenden Zeitskala verläuft (im wesentlichen also über die letzten 50 Jahre

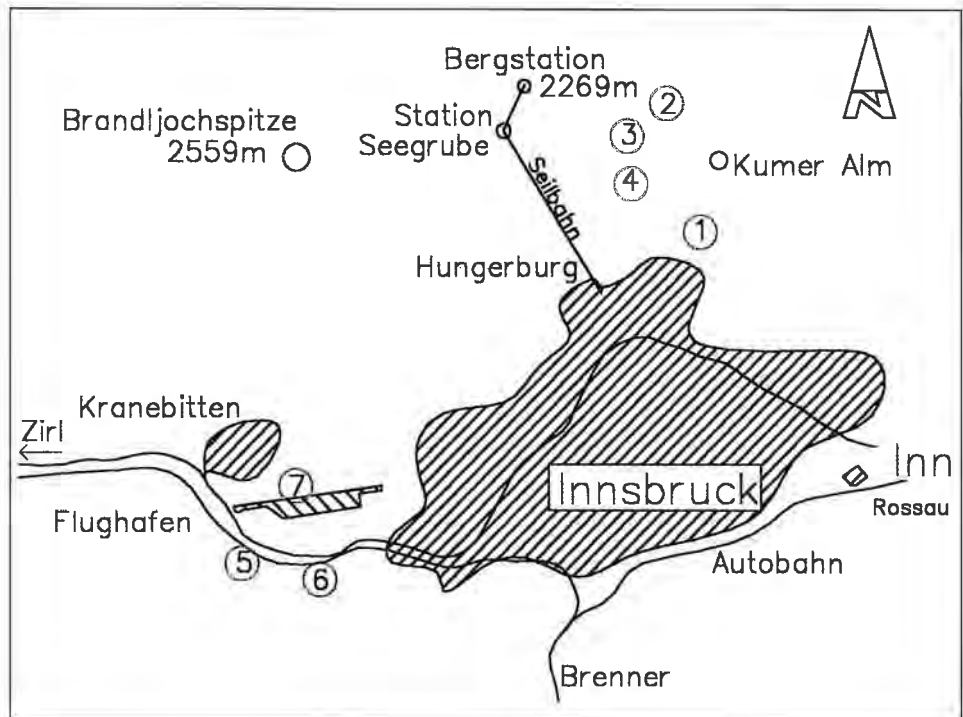


Fig. 1: Lageplan der Entnahmestellen aus dem Bereich Innsbruck. 1 = Mühlauer Bach, Schweinsbrücke, 2 = Rumerstollen, 3 = Klamm bachstollen, 4 = Wurmbachstollen, 5 = TB 1, 6 = V1, 7 = TB 2. Location map of the Innsbruck region. 1 = Mühlauer Bach, Schweinsbrücke, 2 = Rumerstollen, 3 = Klamm bachstollen, 4 = Wurmbachstollen, 5 = TB 1, 6 = V1, 7 = TB 2.

hin), bedarf das Auftreten von Heliumanteilen aus dem Gestein ($\text{He}_{\text{Gestein}}$) zumeist deutlich längerer Zeiträume (hunderte bis tausende von Jahren). Damit bietet die Bestimmung der Heliumisotopengehalte zumindest prinzipiell die Möglichkeit, zwei völlig unterschiedliche Datierungsbereiche zu erfassen.

Der Einfluß von primordialem Helium, daß aus dem Bereich des Erdmantels stammt, ist im Rahmen der hier geschilderten Untersuchungen vernachlässigbar.

3. Ergebnisse

3.1. Untersuchung der Quellwässer des Bereiches Mühlau

An den Grundwässern der Entnahmestellen Nr. 1–4 wurden im Zeitraum von Oktober 1992 bis August bzw. Oktober 1993 in monatlichem bzw. vierzehntägigem Rhythmus Proben zur Bestimmung der zeitlichen Variation der ^{18}O -Gehalte entnommen. Die Ergebnisse der Messungen zur zeitlichen Variation der ^{18}O -Gehalte sind in Fig. 2 dar-

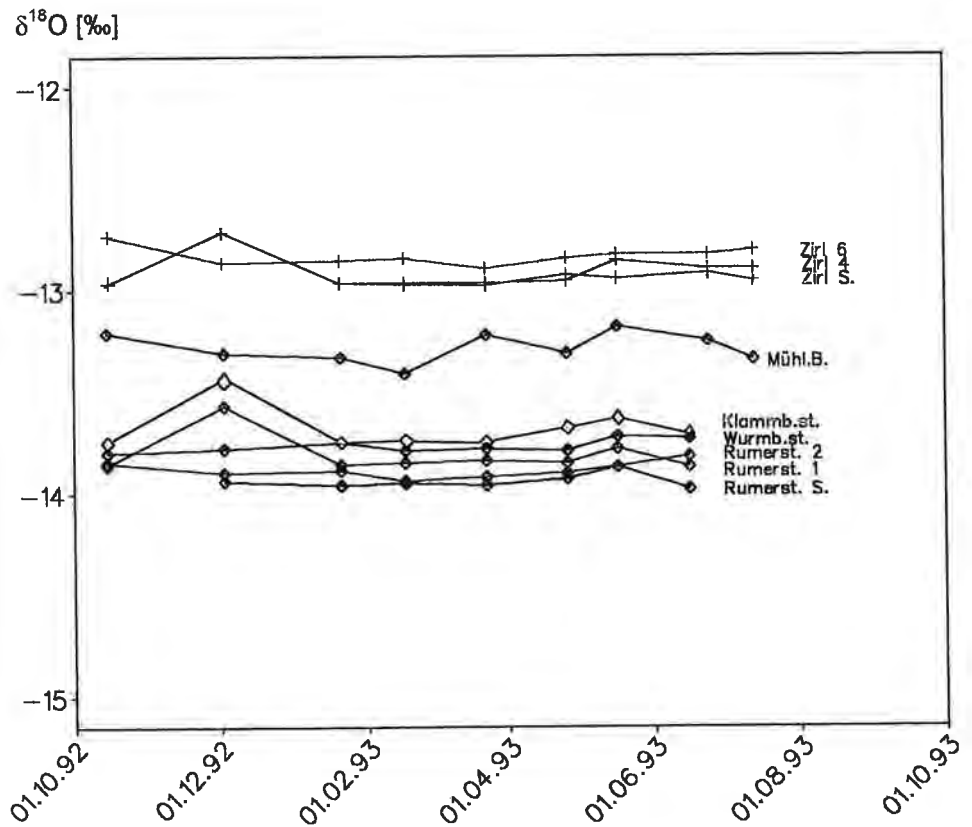


Fig. 2: $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien von Quellwässern aus den Entnahmestellen des Bereiches Mühlau und dem Mühlauer Bach im Vergleich mit solchen aus dem Bereich Zirl.
 $\delta^{18}\text{O}$ pattern of springs in the Mühlau area and of the Mühlauer Bach compared to such of springs in the Zirl area.

Tab. 1: Ergebnisse der Bestimmung der ^2H -, ^{18}O - und ^3H -Gehalte an den Quellwässern am Mühlauer Bach sowie im Bereich Mühlau und Zirl. Die 2σ -Messwertstreuung der $\delta^2\text{H}$ -Werte liegt bei $\pm 15\text{‰}$, die der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bei $\pm 0,15\text{‰}$. Für ^3H -Messungen sind die 2σ -Bereiche jeweils mit angegeben. (Fortsetzung S. 54–55.)
 Results of the ^2H , ^{18}O and ^3H measurements on spring waters of the Mühlau and Zirl areas as well as on samples of the Mühlauer Bach. The analytical uncertainty of the $\delta^2\text{H}$ data is $\pm 1.5\text{‰}$, that of $\delta^{18}\text{O}$ data $\pm 0.15\text{‰}$. The 2σ ranges of the ^3H results are shown in the table. (Continuation p. 54–55.)

Entnahmedatum	^3H [TU]	$\delta^2\text{H}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]
Wurmbachstollen			
15.10.92	$36,1 \pm 2,9$	-98,2	-13,80
03.12.92			-13,78
21.01.93			-13,75
17.02.93			-13,79
23.03.93			-13,78
26.04.93			-13,79
17.05.93	$35,2 \pm 2,4$	-97,3	-13,72
16.06.93			-13,73
09.08.93			-13,73
Klammbachstollen			
15.10.92	$35,1 \pm 2,4$	-98,4	-13,75
03.12.92			-13,74
21.01.93			-13,75
17.02.93			-13,74
23.03.93			-13,75
26.04.93			-13,68
17.05.93	$35,0 \pm 1,9$	-98,2	-13,63
16.06.93			-13,71
09.08.93			-13,74
Rumerstollen 1. Abzweigung			
15.10.92	$38,7 \pm 1,0$	-99,7	-13,86
03.12.92			-13,85
21.01.93			-13,86
17.02.93			-13,85
23.03.33			-13,84
26.04.93			-13,85
17.05.93	$43,3 \pm 3,0$	-97,7	-13,78
16.06.93			-13,87
09.08.93			-13,79
Rumerstollen 2. Abzweigung			
15.10.92	$36,2 \pm 1,6$	-99,7	-13,85
03.12.92			-13,90
21.01.93			-13,89
17.02.93			-13,94
23.03.93			-13,92

Entnahmedatum	^3H [TU]	$\delta^2\text{H}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]
26.04.93			-13,90
17.05.93	$34,8 \pm 1,9$	-99,0	-13,87
16.06.93			-13,82
09.08.93			-13,87
Rumerstollen S			
03.12.92			-13,94
21.01.93			-13,96
17.02.93			-13,95
23.03.93			-13,96
26.04.93			-13,93
17.05.93	$42,0 \pm 2,3$	-99,5	-13,87
16.06.93			-13,98
09.08.93			-13,88
Mühlauer Bach			
15.10.92	$24,5 \pm 2,5$	-97,3	-13,21
03.12.92			-13,31
21.01.93			-13,33
17.02.93			-13,41
23.03.93			-13,22
26.04.93			-13,31
17.05.93	$32,4 \pm 2,4$	-95,8	-13,18
24.06.93			-13,25
13.07.93			-13,34
09.08.93			-13,47
14.09.93			-13,37
11.10.93			-13,38
Zirl Kammer 4			
21.01.93			-12,96
17.02.93			-12,96
23.03.93			-12,96
26.04.93			-12,95
17.05.93	$27,8 \pm 1,9$	-93,1	-12,85
24.06.93			-12,89
13.07.93			-12,89
09.08.93			-12,89
14.09.93			-12,89
11.10.93			-12,83
Zirl Kammer 6			
16.10.92	$27,7 \pm 1,9$	-95,2	-12,77
03.12.92			-12,86
21.01.93			-12,85
17.02.93			-12,84

Entnahmedatum	^3H [TU]	$\delta^2\text{H}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]
23.03.93			-12,89
26.04.93			-12,84
17.05.93	$31,3 \pm 2,9$	-93,5	-12,82
24.06.93			-12,82
13.07.93			-12,80
09.08.93			-12,80
14.09.93			-12,91
11.10.93			-12,96
Zirl Sammelwasser			
16.10.92	$23,7 \pm 2,0$	-96,7	-12,96
03.12.92			-12,75
21.01.93			-12,96
17.02.93			-12,97
23.03.93			-12,97
26.04.93			-12,92
17.05.93	$24,3 \pm 1,5$	-94,7	-12,94
24.06.93			-12,91
13.07.93			-12,95
09.08.93			-12,91
14.09.93			-12,89
11.10.93			-12,93

gestellt und in Tab. 1 aufgelistet. Zum Vergleich sind in Fig. 2 zusätzlich die Ergebnisse von Messungen an Quellwässern, die in einem Stollen bei Zirl gefaßt wurden, mit eingezeichnet. Während der ^{18}O -Gehalt im Mühlauer Bach im Jahresverlauf Unterschiede aufweist, die signifikant außerhalb der analytischen Genauigkeit ($\pm 0,15$ ‰) liegen, schwanken die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der jeweiligen Quellen innerhalb $\pm 0,15$ ‰ um einen Mittelwert. Allerdings scheinen die systematisch höheren Werte für die Mühlauer Quellwässer vom 17. 5. 1993 doch auf eine, wenn auch geringe, gleichlaufende Variation zu deuten.

Weiterhin sind in Tab. 1 die Ergebnisse der $\delta^2\text{H}$ - und Tritiummessungen an den beprobten Quellwässern des Bereiches Mühlau angegeben. Nur der zweite $\delta^2\text{H}$ -Wert vom Mühlauer Bach ist signifikant „schwerer“ als der Mittelwert von $-98,3$ ‰.

Die Tritiumgehalte sind an den Entnahmestellen Rumerstollen 1. Abzweigung und S etwas höher als am Wurmbach- und Klamm Bachstollen sowie am Rumerstollen 2. Abzweigung. Der Mühlauer Bach weist nochmals niedrigere Tritiumgehalte auf. Insgesamt sind die Tritiumgehalte höher als im aktuellen Niederschlag.

3.2. Untersuchung der Grundwässer aus den Tiefbrunnen der Talfüllung

Die Ergebnisse der langjährigen Meßwertreihen an den Grundwässern der Talfüllung sind in Tab. 2 aufgelistet. Die Grundwässer der Entnahmestellen VI, TB 1 und TB 2 stellen sich hinsichtlich der Gehalte an ^3H und ^{18}O als langfristig weitgehend gleich dar. Die Tritiumgehalte im Grundwasser von TB 2 sind seit 1985 unterhalb der Nachweisgrenze, die von TB 1 zeigen ^3H -Gehalte um 4 TU und liegen damit weit unterhalb

Tab. 2: Isotopengehalte der Grundwässer der Entnahmestellen TB 1, TB 2 und V1 im Untersuchungszeitraum Juli 1982 bis Oktober 1993. Die 2 σ -Messwertstreuung der $\delta^2\text{H}$ -Werte liegt bei $\pm 1,5$ ‰, die der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bei $\pm 0,15$ ‰ und die der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte bei $\pm 0,3$ ‰. Für ^3H - und ^{14}C -Messungen sind die 2 σ -Bereiche jeweils mit angegeben.

Isotope results for the groundwaters of TB 1, TB 2 and V1 between July 1982 and October 1993. The analytical uncertainty of the $\delta^2\text{H}$ data is ± 1.5 ‰, that of $\delta^{18}\text{O}$ data ± 0.15 ‰ and that of $\delta^{13}\text{C}$ data ± 0.3 ‰. The 2 σ ranges of the ^3H - and ^{14}C results are shown in the table.

Entnahmedatum	^3H [TU]	$\delta^2\text{H}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	^{14}C [pmc]
TB 1					
19.07.82	4,8 \pm 0,5	-96,8	-13,20		
23.07.87	4,2 \pm 0,5		-12,56		
15.10.92	5,1 \pm 1,0	-98,2	-13,21		
03.12.92			-12,98		
17.05.93	3,1 \pm 1,0	-94,1	-13,17		
23.09.93	3,1 \pm 0,8	-97,7	-13,18		
TB 2					
19.07.82	0,47 \pm 0,15	-95,3	-12,94		
19.07.82	0,36 \pm 0,39	-95,1	-12,91		
19.07.82	0,18 \pm 0,14	-95,1	-12,91		
26.09.83	0,25 \pm 0,12				
24.11.83	< 1,8	-94,9	-12,95		
15.12.83	0,20 \pm 0,13	-94,8	-12,93	-10,40	55,7 \pm 2,4
15.12.83	0,17 \pm 0,10	-95,7	-13,05	-10,40	56,8 \pm 2,4
23.05.84	< 1,0	-95,2	-13,01		
03.07.84	0,20 \pm 0,11	-95,4	-13,08	-10,40	67,1 \pm 2,8
27.10.85	< 1,2	-95,1	-13,16		
11.11.85	< 1,3	-94,3	-13,03	-10,80	64,1 \pm 3,5
23.07.87	< 0,4			-10,51	62,6 \pm 2,9
15.10.92	< 1,5	-96,8	-13,05		
17.05.93	< 1,5	-94,8	-12,91	-10,51	65,0 \pm 1,9
23.09.93	< 1,5	-97,1	-13,01		
23.09.93	< 1,5	-97,0	-13,03		
24.09.93			-12,99		
24.09.93			-12,96		
V1					
19.07.82	48,5 \pm 2,9	-97,8	-13,40		
24.11.83	46,8 \pm 4,4	-97,5	-13,31		
15.12.83	49,1 \pm 3,3	-97,4	-13,40	-8,60	51,0 \pm 2,3
23.05.84	44,9 \pm 3,4	-98,1	-13,47		
03.07.84	49,4 \pm 3,9	-98,2	-13,42	-8,50	62,7 \pm 6,0
27.10.85	47,1 \pm 4,1	-97,3	-13,42		
11.11.85	46,3 \pm 3,6	-97,0	-13,40	-8,50	58,4 \pm 3,3
23.07.87	40,7 \pm 3,1		- 8,98		62,6 \pm 3,1
15.10.92	28,8 \pm 2,1	-100,8	-13,52		
03.12.92			-13,57		
17.05.93	28,1 \pm 1,9	-97,2	-13,40	-9,40	57,3 \pm 2,1
23.09.93	26,9 \pm 1,8	-98,2	-13,52		

des aktuellen Niederschlagwertes. Die Tritiumgehalte im Grundwasser von V1 liegen etwas unterhalb derjenigen des Mühlauer Baches. Die ^{14}C -Gehalte des DIC im Grundwasser der Entnahmestelle TB 2 und V1 sind mit 57–65 pmc (*percent modern carbon*) innerhalb der Analysengenauigkeit gleich und zeigen erwartungsgemäß auch keine Abweichungen von den Ergebnissen früherer Untersuchungen.

Figur 3 zeigt die Ergebnisse der Heliumisotopenuntersuchungen. Auf der Abszisse ist der inverse, um Luftüberschußanteile („excess air“; vgl. auch T. H. E. HEATON & J. C. VOGEL, 1981) reduzierte und auf den Löslichkeitsgehalt normierte ^4He -Gehalt der Proben aufgetragen; die Ordinate ist mit dem um Luftüberschußanteile korrigierten $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältniswert bezeichnet (S. M. WEISE & H. MOSER, 1987). Aus der Lage der Meßpunkte für die Grundwasserproben vom TB 2 wurde die in Fig. 3 eingezeichnete Produktionsgerade mit einem $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wert von $0,08 \times 10^{-6}$ für das diffusiv in das Wasser gelangte Helium berechnet. Aus dem lotrechten Abstand der Meßpunkte für die Proben von V1 zu dieser Produktionsgeraden lassen sich die aus dem Zerfall von „meteorischem“ Tritium stammenden ^3He -Anteile berechnen, die in Tab. 2 in $\text{TU}_{\text{Äquivalent}}$ angegeben sind, wobei $1 \text{ TU}_{\text{Äquivalent}} (= 2,49 \times 10^{-15} \text{ Normalmilliliter } ^3\text{He pro Gramm Wasser})$ diejenige ^3He -Konzentration beschreibt, die sich aus dem vollständigen Zerfall von 1 TU Tritium ergibt. Die Differenz der Werte von 1987 und 1983 (etwa $6 \text{ TU}_{\text{Äquivalent}}$) entspricht innerhalb der Unsicherheitsbereiche dem Unterschied der entsprechenden Tritiumgehalte (gut 8 TU).

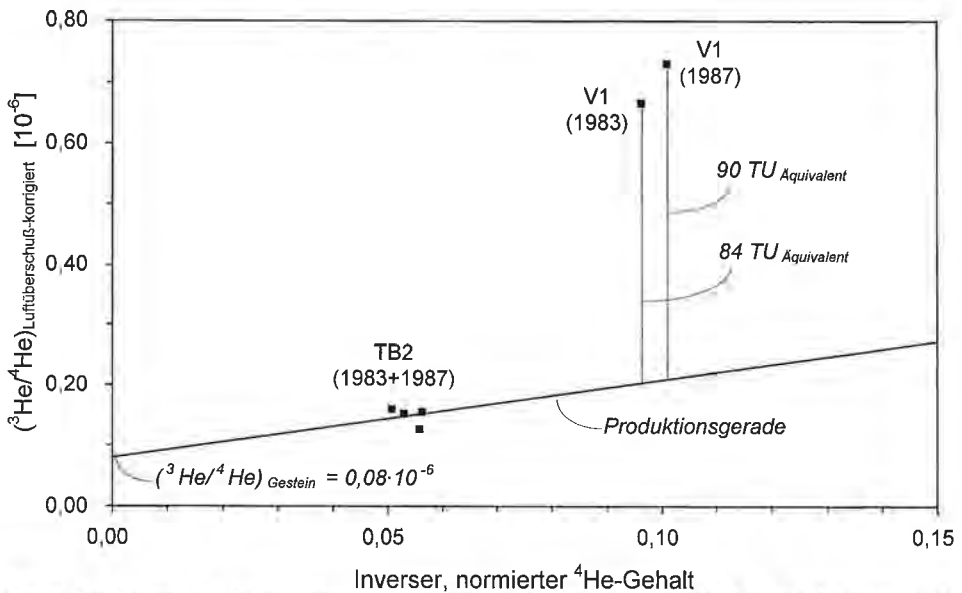


Fig. 3: Ergebnisse der Heliumisotopenmessungen an Proben von V1 und TB 2. Die Achsenbezeichnungen, der Ursprung der Produktionsgeraden und die Bedeutung der Abstände der Meßpunkte von der Produktionsgeraden sind im Text ausgeführt.

Helium isotope results from samples of the wells V1 and TB 2. On the x axis, the measured ^4He content, reduced for excess-air helium, is shown inverted and normalized to the ^4He solubility content. On the y axis, the measured $^3\text{He}/^4\text{He}$ isotope ratio also reduced for excess-air helium is given. The "Produktionsgerade" is constructed with the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio of the excess helium in the samples of TB 2. The signed distances of the V1 data points are expressed in amounts of tritiogenic ^3He .

Aus den Resultaten des Kurzpumpversuches in der Bohrung TB 2 ist abzuleiten, daß das mit der TB 2 erschlossene Grundwasser trotz impulsartig, hoher Entnahmeraten keine Variation in den Isotopengehalten zeigt. Entsprechend kann am Beispiel des Wassers der Entnahmestelle V1 auch bei den gegebenen Betriebsbedingungen abgeleitet werden, daß aus langjährigen Isotopenuntersuchungen persistente Vorgaben zur Modellierung des Strömungsverhaltens im Untergrund erhalten werden.

4. Klassifizierung der Grundwässer

4.1. Höhenlage des Einzugsgebietes

Die Bestimmung der ^{18}O -Gehalte der Grundwässer eines Untersuchungsgebietes gibt einen Hinweis auf die Höhenlage der Einzugsgebiete der Grund- und Oberflächenwässer (Höheneffekt). In früheren Untersuchungen (H. MOSER & W. RAUERT, 1980,

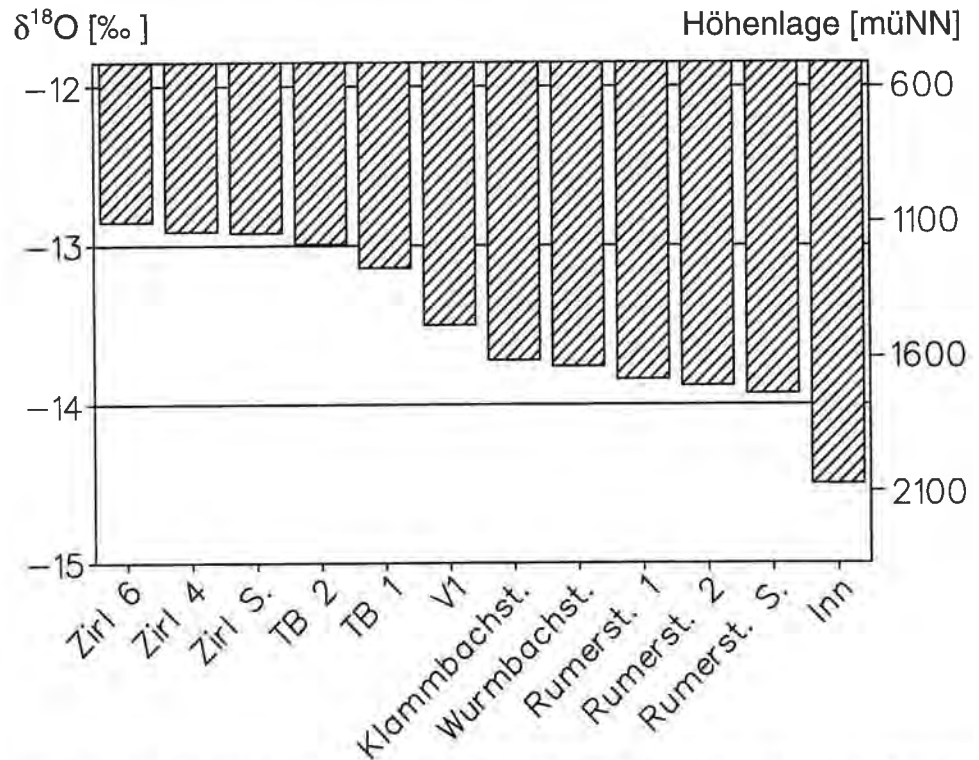


Fig. 4: Mittlere ^{18}O -Gehalte der untersuchten Quell-, Oberflächen- und Grundwässer des Bereiches Innsbruck. Zum Vergleich ist der Wert für das Wasser des Inns (W. RAUERT, pers. Mitteilung 1986) mit eingezeichnet. Die rechte Ordinate ist mit der dem Höheneffekt (vgl. Text) zufolge den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten zuzuordnenden Höhenlage bezeichnet.
 Mean ^{18}O contents of investigated spring-, surface- and groundwaters of the Innsbruck region. For comparison, the Inn river value is shown, too (W. RAUERT, pers. comm. 1986). The right hand side-y axis shows the altitudes calculated from the $\delta^{18}\text{O}$ -altitude effect.

D. I. QUINGER, pers. Mitteilung, 1991) ist festgehalten, daß der Höheneffekt im Bereich Innsbruck eine Steigung von $-0,17 \text{ ‰}$ je 100 m Höhendifferenz hat. Eine mittlere Höhenlage von ca. 960 m (Scharnitz) entspricht diesen Untersuchungen zufolge einem mittleren $\delta^{18}\text{O}$ -Wert von $-12,6 \text{ ‰}$, womit sich zwischen mittlerer Höhenlage h und dem damit verbundenen $\delta^{18}\text{O}$ -Wert folgender Zusammenhang ergibt:

$$\delta^{18}\text{O} [\text{‰}_{\text{SMOW}}] = -0,0017 \text{ ‰}_{\text{SMOW}}/\text{m} \cdot h [\text{m}] - 10,968 \text{ ‰}_{\text{SMOW}}. \quad (1)$$

In Fig. 4 sind die ^{18}O -Gehalte der Grundwässer aus den verschiedenen Entnahmestellen in der Reihenfolge steigender $\delta^{18}\text{O}$ -Werte dargestellt. Die mittleren ^{18}O -Gehalte der Grund- und Quellwässer liegen im Bereich von $-13,98$ bis $-12,65 \text{ ‰}$ und entsprechen voneinander deutlich unterscheidbaren mittleren Höhenlagen der Einzugsgebiete, wie ebenfalls aus Fig. 4 zu ersehen ist.

Die Quellwässer mit den aus den ^{18}O -Gehalten abgeleiteten, höchstgelegenen Einzugsgebieten sind die Quellen des Mühlauer Stollens. Die größte Differenz der durchschnittlichen ^{18}O -Gehalte der Stollenwässer ist für die Entnahmestellen Rumerstollen S sowie Klammbachstollen festzustellen und beträgt dort $0,21 \text{ ‰}$. Diese Differenz der ^{18}O -Gehalte deutet auf einen Unterschied in der Höhenlage der Einzugsgebiete von etwa 100 m. Die mittlere Höhenlage der Einzugsgebiete der Stollenwässer liegt entsprechend den ^{18}O -Gehalten im Bereich von 1600 bis 1700 Höhenmetern. Dem um $0,4$ – $0,6 \text{ ‰}$ niedrigeren gemittelten ^{18}O -Gehalt des Mühlauer Baches entsprechend liegt die mittlere Höhenlage der Einzugsgebiete aller Quellzuflüsse zum Mühlauer Bach bei etwa 1400 m. Die in Fig. 2 mit eingezeichneten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte für Quellwässer aus dem Bereich Zirl entsprechen einer noch geringeren Höhenlage ihres Einzugsgebietes, wie sie auch für einen größeren Teil der Zuflüsse in den Mühlauer Bach anzunehmen ist.

4.2. Altersmäßige Klassifizierung und Fließverhalten

Ein Zusammenhang zwischen Isotopendaten und dem Fließverhalten von Grund- oder Quellwässern ist dadurch gegeben, daß sich die vorliegenden, hydraulischen Verhältnisse im Grad der Dämpfung des Isotopen-Inputsignals (im Grundwasser/Outputsystem) und im zeitlichen Verlauf der Outputkurve der Grund- oder Quellwässer widerspiegeln.

Bei Vorliegen langjähriger Meßwertreihen zu Isotopengehalten können über Computerprogramme (z. B. MULTIS, Release 2.0) Annahmen zum Fließverhalten des Grundwassers modellhaft durchgerechnet, anhand der vorliegenden Werte verglichen und so insgesamt realitätsbezogene Aspekte zur Kalibrierung von Grundwasserströmungsmodellen ausgearbeitet werden. Hierzu wird für das jeweilig ausgewählte Fließmodell ein zeitlicher Verlauf von Erwartungswerten (theoretische Outputfunktion) errechnet und an die Meßwertreihe der Isotopengehalte approximiert.

Bestehende Grundwasserströmungsmodelle (z. B. Piston-Flow-, Exponential-, Dispersionsmodell; vgl. A. ZUBER, 1986) stellen zumeist stark vereinfachte Annahmen zum natürlichen Fließverhalten von Grundwasser dar, die in der Natur oft nur unvollständig erfüllt sind. Eine Annäherung an die durch die Meßwerte wiedergespiegelten natürlichen Gegebenheiten kann über Kombinationen der Modelle z. B. durch ihre „Parallel“- oder „Hintereinanderschaltung“ im Sinne einer Anpassung an die lokal vorliegenden Strömungsbedingungen erfolgen.

Ein Vergleich der Kurve aus den ermittelten theoretischen Outputwerten mit den gemessenen Tritiumgehalten zeigt, wie gut das angewandte Modell, mit dem die Grundwasserströmung und die im Grundwasser vorhandenen Durchmischungsvorgänge be-

schrieben werden, mit der realen, hydraulischen Situation übereinstimmt. Ein Maß für die Güte der Anpassung wird hierbei aus der Errechnung der mittleren Abweichung des angenäherten Modellwertes an die Meßwerte erhalten (Gütefunktion).

Liegen für einen Grundwasserleiter keinerlei hydrogeologische Informationen und nur einzelne Ergebnisse der Bestimmung der ^3H -Gehalte vor, so werden für die Bestimmung des Alters bzw. der MVZ zunächst nur das Piston-Flow-Modell (PFM) und das Exponential-Modell (EM) ausgewählt. Grund hierfür ist, daß diese beiden Modelle im allgemeinen als Extremfälle einer möglichen Grundwasserströmung angesehen werden können. Die aus beiden Modellen berechneten „Grundwasseralter“ bzw. mittleren Verweilzeiten überstreichen dann einen Zeitbereich, in dem die tatsächliche MVZ des untersuchten Grundwassers liegt.

Mit einer zunehmenden Vergrößerung des Beobachtungszeitraums, für den Ergebnisse von Isotopengehalten an Grundwässern vorliegen, ist auch eine zunehmende Annäherung an die realen, hydraulischen Bedingungen gegeben, die parallel zu einer zunehmenden Realitätsnähe der MVZ eines Grundwasserleiters führen.

4.2.1. Bereich Mühlau

Die Unterschiede der im Bereich Mühlau an den Quellwässern und am Bach bestimmten ^3H -Gehalte sind im Sinne einer altersmäßigen Gruppierung interpretierbar. Bei Annahme einer exponentiellen Altersverteilung im Bachwasser (Exponentialmodell; vgl. z. B. A. ZUBER, 1986) ist auf eine MVZ von 5–10 Jahren zu schließen. Dieser Schluß ist konsistent mit der relativ geringen Variation der ^{18}O -Gehalte, die einen Hinweis darauf geben, daß der Bach vorwiegend von Grundwässern gespeist wird.

Für die Wässer der Mühlauer Quellen mit ^3H -Gehalten um 35 TU (Entnahmestellen Klammbachstollen, Wurmbachstollen und Rumerstollen 2. Abzweigung) läßt sich bei Anwendung des Exponentialmodells (EM) für diese Wässer als Rechenergebnis eine MVZ von etwa 10 Jahren oder aber von etwa 60 Jahren ermitteln. Der errechnete Wasseranteil mit einem „Alter“ unter ca. 10 Jahren („Jungwasseranteil“) beträgt dann entsprechend ca. 60 % bzw. um 15 %. Wird zur Interpretation zusätzlich zu den Tritiumresultaten der Jahre 1992/93 noch der Tritiumgehalt aus dem Jahre 1987 mit 55,8 TU herangezogen, dann ergäbe sich bei Anwendung des Exponentialmodells genau eine mittlere Verweilzeit von ca. 50 Jahren.

Für die Quellwässer mit ^3H -Gehalten um 40 TU (Entnahmestellen Rumerstollen S und Rumerstollen 1. Abzweigung) ist analog auf eine mittlere Verweilzeit von 10–15 Jahren bzw. von 40–50 Jahren bei „Jungwasseranteilen“ von ca. 60 % bzw. 25 % zu schließen.

Da die maximale Differenz der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der einzelnen Entnahmestellen des Mühlauer Stollens innerhalb des meßtechnischen Unsicherheitsbereiches bleibt, können größere Anteile schnell infiltrierender Komponenten (MVZ < 2 Jahre) ausgeschlossen werden.

4.2.2. Grundwässer des Talbereiches

Unter Berücksichtigung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte und der DIC-Konzentrationen ergibt sich für die Grundwässer des Talbereiches eine mittlere Verweilzeit von unter ca. 2000 Jahren, da mit den Resultaten die untere Datierungsgrenze der ^{14}C -Methode erreicht wird.

Die ^3H -Gehalte von 3 ± 1 TU bzw. 5 ± 1 TU im Grundwasser der Entnahmestelle TB 1 deuten auf ein Mischwasser aus zumindest zwei Komponenten: Die eine, mengenmäßig dominierende Komponente ist dabei ein Grundwasser, das sich vor 1952 neu-

gebildet hat, die zweite Komponente ist „junges“, d. h. tritiumhaltiges, Grund- oder Oberflächenwasser.

Weil der Tritiumgehalt des Grundwassers aus Brunnen TB 2 im Bereich der Nachweisgrenze lag, ist abzuleiten, daß das Grundwasser des TB 2 vor 1952 neugebildet wurde. Anteile von Grundwasser, die nach 1952 neugebildet wurden, sind nicht nachweisbar. Um dieses Ergebnis abzusichern, wurde im Rahmen des Kurzpumpversuches auch der ^{85}Kr -Gehalt in diesem Grundwasser bestimmt, da der ^{85}Kr -Gehalt im Gegensatz zum ^3H -Gehalt eine in den letzten Jahrzehnten ansteigende Input-Charakteristik aufweist und damit einen für Zumischungen jüngerer Wässer besonders sensiblen Nachweis darstellt (M. FORSTER et al., 1992). Mit einem ^{85}Kr -Gehalt von $\leq 0,5$ dpm ($^{85}\text{Kr}/\text{ml Kr}$) bestätigte sich das aus den ^3H -Gehaltsbestimmungen abgeleitete Resultat.

Für das Grundwasser der Entnahmestelle V1 wurde entsprechend des Tritiumgehaltes von etwa 28 TU in den Jahren 1992/93 eine MVZ im Bereich von deutlich über 40 Jahren bestimmt. Eine genauere Bestimmung der MVZ ist möglich, wenn Angaben zum Fließverhalten getroffen werden können. Die für den gesamten Zeitbereich relativ geringe Änderung der ^3H -Werte läßt den Schluß zu, daß das PFM als Fließmodell ausscheidet. Da keine detaillierten, hydrogeologischen Untersuchungen vorliegen, wurden die Erwartungswerte der Outputfunktion für die beiden anderen Grundlagensmodelle, nämlich für das EM und beispielhaft für das Dispersionsmodell erstellt. Aus den graphischen Darstellungen (Fig. 5) und den Abweichungen der Meßwerte von den Erwartungswerten der Outputfunktion, die für das Exponentialmodell lediglich 2,4 TU und für das Dispersionsmodell nur 3,8 TU betragen, ist zu schließen, daß die gewählten Modelle die reale hydraulische Situation plausibel beschreiben. Eine noch bessere Anpassung an das Fließgeschehen wird durch die Reihenschaltung des EM mit dem PFM erhalten (Fig. 6; Anteil des EM = 90 %). Unabhängig vom angenommenen Fließmodell ergibt sich als Rechenergebnis für das Grundwasser aus V1 eine MVZ von deutlich über 40 Jahren.

Die Ergebnisse der punktuellen Heliumisotopenuntersuchungen führen zu übereinstimmenden Schlüssen: Wie Fig. 7 zeigt, reagiert die aus den Verhältniswerten der gemessenen $^3\text{He}_{\text{Tritium}}$ - und ^3H -Gehalte der Proben von V1 ($84 \text{ TU}_{\text{Äquivalent}}/49,1 \text{ TU}$ für 1983 und $90 \text{ TU}_{\text{Äquivalent}}/40 \text{ TU}$ für 1987) abgeleitete MVZ sehr sensibel auf die zugrunde gelegten Modellannahmen. Unter PFM-Bedingungen errechnet sich eine MVZ T_{PFM} zwischen 15 und 25 Jahren, unter EM-Bedingungen dagegen eine solche um etwa 40 Jahre (T_{EM} ; vgl. Fig. 7). Letzterer Bereich liegt unterhalb des aus den ^3H -Einzelmessungen und -Meßreihen abgeleiteten Wertes. Dieser Unterschied, der einem Fehlbetrag von ca. 5–10 $\text{TU}_{\text{Äquivalent}}$ entspricht, könnte durch einen systematischen $^3\text{He}_{\text{Tritium}}$ -Verlust des Grundwassers während der Neubildungsphase in der ungesättigten Bodenzone verursacht sein. In jedem Falle aber unterstützen die $^3\text{He}/^3\text{H}$ -Daten die Vorstellung, daß der exponentielle Anteil von Grundwasser an der Altersverteilung die tatsächlichen Verhältnisse im Grundwasser von V1 repräsentiert.

Für die Grundwasserströmungsverhältnisse im Bereich des Brunnens V1 bedeutet dies, daß dem Brunnen V1 primär Grundwasser eines Grundwassermischsystems zuströmt, das, für sich als Einkomponentensystem betrachtet, eine errechnete MVZ von ca. 90 Jahren besitzt.

Die im Einzugsbereich des Brunnens bestehenden hydrologischen Gegebenheiten lassen sich als Grundwassermischsystem aus zwei Komponenten darstellen: Die „ältere“ Komponente besitzt einen mengenmäßigen Zumischungsanteil von ca. 40 % bei einer MVZ von ca. 160 Jahren, die „jüngere“ Komponente analog einen Mengenanteil von ca. 60 % bei einer MVZ um 40 Jahre.

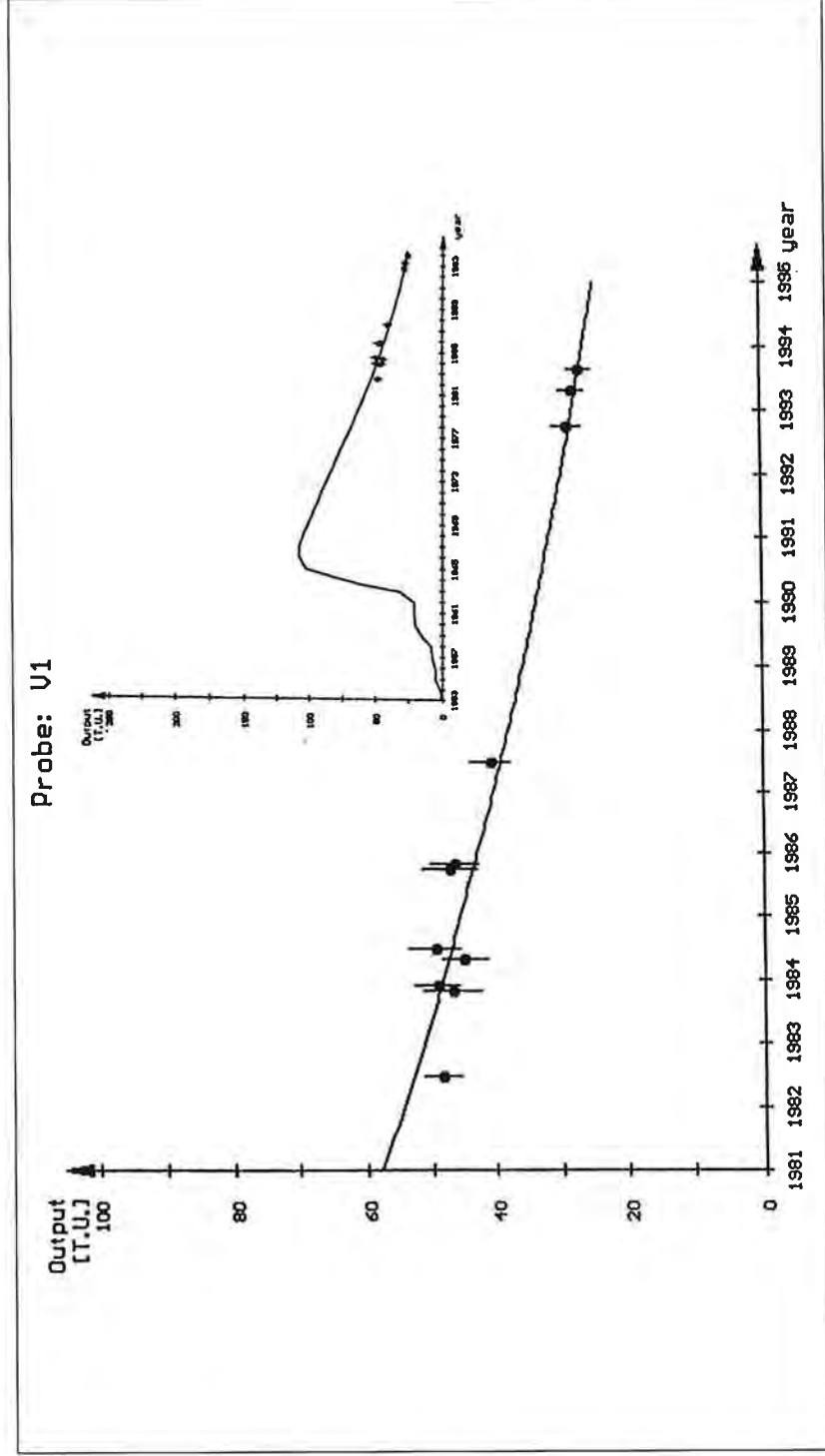
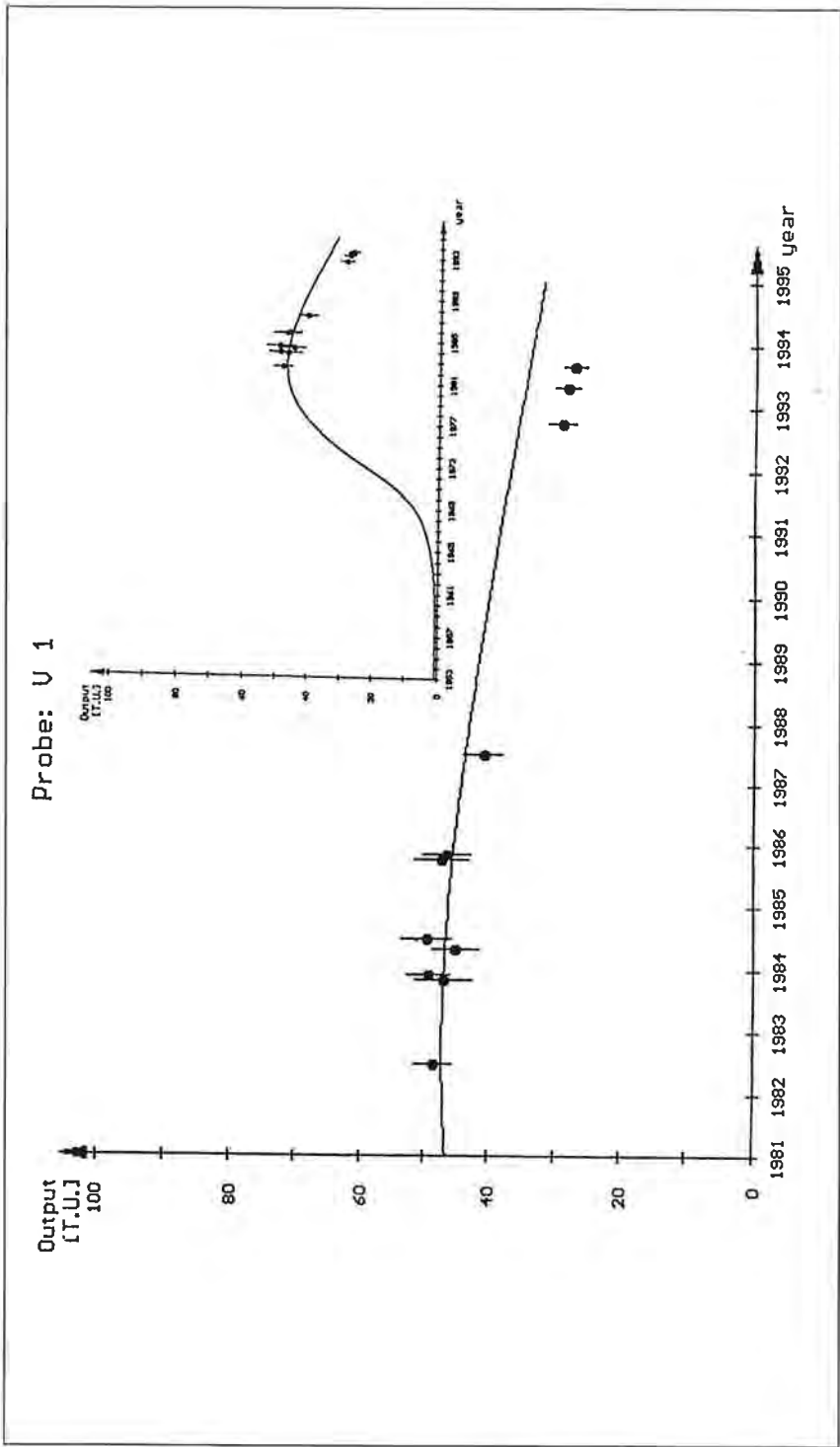
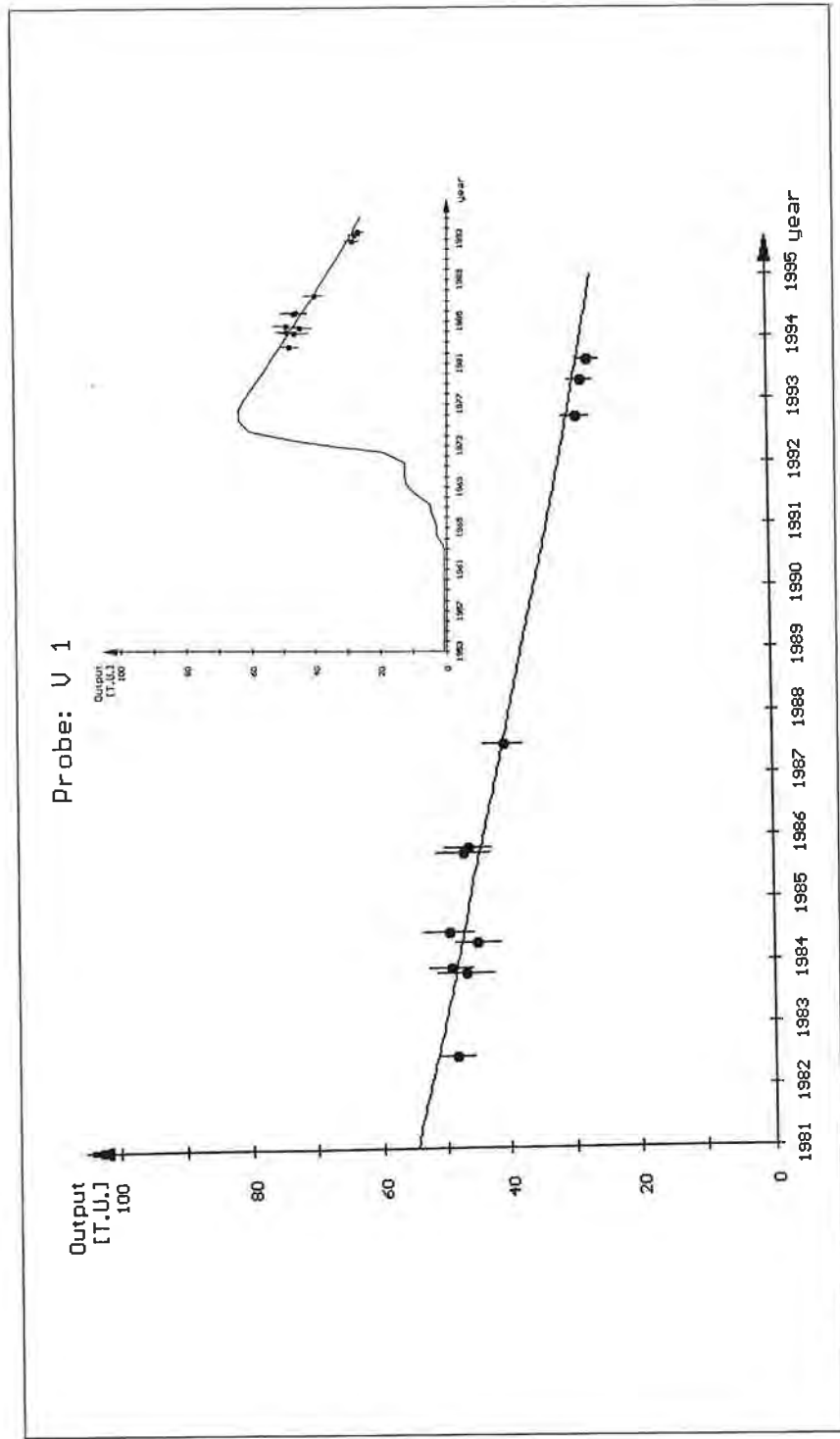


Fig. 5: ^3H -Outputfunktionen für das Grundwasser des Brunnens V1 mit den gemessenen ^3H -Gehalten unter der Annahme des Exponentialmodells (EM; obere Graphik) und des Dispersionsmodells (DM; Graphik S. 63) als Fließmodell. Die errechnete MVZ liegt für das EM bei 86 a und für das DM bei 90 a mit $D/vx = 0,5$.
 ^3H outputfunctions of the V1 groundwater assuming exponential model conditions (EM, upper part) and dispersion model conditions (DM, part p. 63), respectively, as well as the measured values. The calculated mean residence time is 86 a for the EM and, with $D/vx = 0,5$, 90 a for the DM.





Probe: V 1

Fig. 6: Die ^3H -Outputfunktion für das Grundwasser des Brunnens V1 mit den gemessenen ^3H -Gehalten unter der Annahme einer EM-PFM-Kopplung als Fließmodell. Mit einem EM-Anteil von 90 % errechnet sich die MVZ dabei zu 94 a.
 The ^3H outputfunction of the V1 groundwater assuming EM-PFM conditions in series and the measured values. With an EM fraction of 90 % the mean residence time is calculated to 94 a.

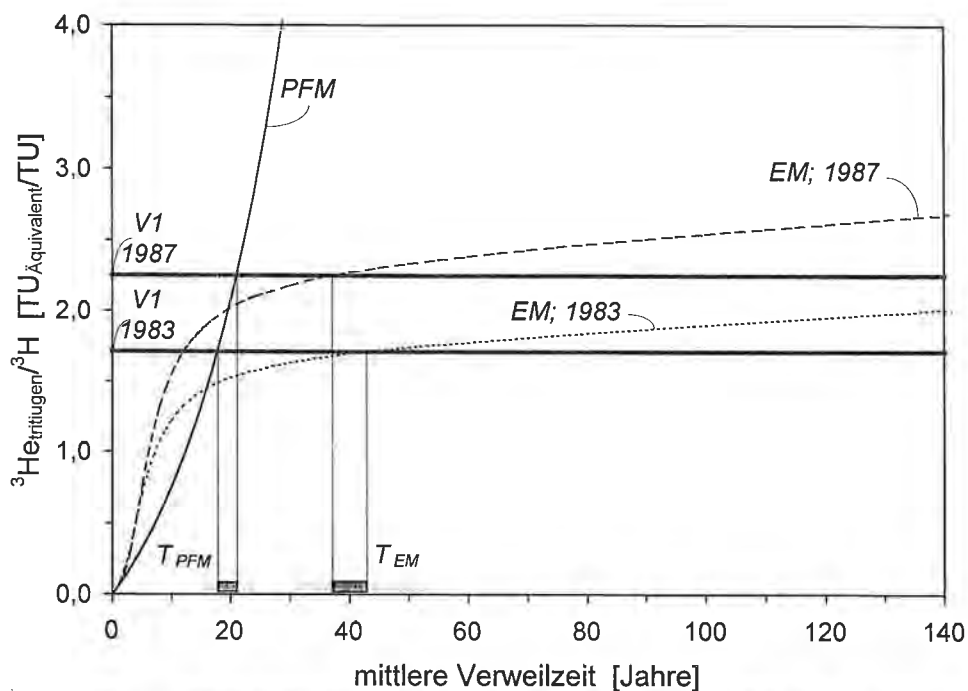


Fig. 7: $^3\text{He}_{\text{trüngen}}/^3\text{H}$ -Outputfunktionen für das Grundwasser des Brunnens V1 mit den gemessenen Werten unter der Annahme eines EM bzw. PFM als Fließmodell. Da im Falle des PFM das $^3\text{He}_{\text{trüngen}}/^3\text{H}$ -Verhältnis ausschließlich durch die Gesetzmäßigkeit des radioaktiven Zerfalls bestimmt ist, besteht keine Abhängigkeit vom Probenahmezeitpunkt.
 $^3\text{He}_{\text{trüngen}}/^3\text{H}$ outputfunction of the V1 groundwater assuming EM and PFM conditions and the measured values as bars. Because PFM conditions correspond to the simple applicability of the law of radioactive decay, no dependency on date of sample collection exists.

Zusammenfassung

Aus dem Vergleich der ^{18}O -Gehalte des Mühlauer Baches, der Mühlauer sowie Zirler Quellen mit dem regionalen Höheneffekt konnte auf die Höhenlage der Einzugsgebiete geschlossen werden. Das Fehlen signifikanter Jahresgänge in den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten zusammen mit den Werten für die ^3H -Gehalte der entsprechenden Quellwässer deutet auf ein Verweilzeitspektrum mit Schwerpunkt um 10 bzw. über 40 Jahre, was als Hinweis auf sehr weit verzweigte Kluft Räume gesehen werden kann. Der Jahresgang im ^{18}O -Gehalt weist im Falle des Wassers des Mühlauer Baches die Anbindung an sehr kurzzeitig durchströmte, vermutlich kleinräumige Fließsysteme nach.

Geringe ^3H -Gehalte im Grundwasser des TB 1 weisen auf einen gewissen Zufluß einer „jungen“, d. h. besonders kontaminationsanfälligen, Grundwasserkomponente. Die geringe Ergiebigkeit des Brunnens ließ eine genauere Spezifizierung dieser Komponente über weitere Isotopenmethoden nicht zu.

Im Grundwasser des TB 2 ist entsprechend der ^3H - und ^{85}Kr -Gehalte keine „junge“, seit Anfang der 50er Jahre neugebildete Komponente nachweisbar. Der ^4He -Überschuß

ist vereinbar mit einer Verweilzeit im Bereich von Hunderten von Jahren, während die Ergebnisse der ^{14}C -Gehaltsbestimmungen auf eine mittlere Verweilzeit unter ca. 2000 Jahre schließen lassen.

Die aus langjährigen Meßreihen vorliegenden ^3H -Gehalte im Grundwasser von V1 konnten mit einfachen Vorstellungen über das Verweilzeitspektrum und Fließverhalten des Grundwassers in Deckung gebracht werden, in denen eine exponentielle Verweilzeitverteilung dominiert. Die Ergebnisse punktueller Heliumisotopenanalysen liegen dazu in qualitativer Übereinstimmung.

Aus den dargestellten Untersuchungen wird beispielhaft deutlich, daß der Einsatz isopenhydrologischer Methoden weitreichende Aussagen zu Ursprung und Entwicklung des Grundwassers sowie zu dessen Fließverhalten ermöglichen. Die Ergebnisse stellen eine wesentliche Basis für die Abschätzung von Gefährdungspotentialen dar.

Literatur

- FORSTER, M., H. H. LOOSLI & S. M. WEISE (1992): ^{39}Ar -, ^{85}Kr -, ^3He - and ^3H Isotope Dating of Ground Water in the Bocholt and Segeberger Forst Aquifer Systems.- In: MATTHESS, G., F. H. FRIMMEL, P. HIRSCH, H. D. SCHULZ & E. USDOWSKI (Ed., 1992): *Progress in Hydrogeochemistry*.- 467-475, Berlin (Springer).
- FRITZ, P. & J.-Ch. FONTES (Ed., 1980): *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry Vol. 1: The terrestrial environment A*.- 545 S., Amsterdam (Elsevier).
- FRITZ, P. & J.-Ch. FONTES (Ed., 1986): *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry Vol. 2: The terrestrial environment B*.- 557 S., Amsterdam (Elsevier).
- HEATON, T. H. E. & J. C. VOGEL (1981): "Excess air" in groundwater.- *J. Hydrol.*, 50, 201-216, Amsterdam.
- MOSER, H. & W. RAUERT (1980): *Isotopenmethoden in der Hydrologie*.- In: MATTHESS, G. (Ed., 1980): *Lehrbuch der Hydrogeologie*.- Bd. 8, 400 S., Berlin (Gebrüder Borntraeger).
- WEISE, S. M. & H. MOSER (1987): Groundwater dating with helium isotopes.- In: IAEA (1987): *Isotope Techniques in Water Resources Development*.- 105-126, Wien.
- ZUBER, A. (1986): Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwaters systems.- In: FRITZ, P. & J.-Ch. FONTES (Ed., 1986): *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry Vol. 2: The terrestrial environment B*.- 1-59, Amsterdam (Elsevier).

Summary

On ground- and surface waters of the Innsbruck region the potential of selected isotope methods for parametrizing the hydrologic system in view of anthropogenic pollution is demonstrated. ^2H -, ^3H -, $^3\text{He}/^4\text{He}$ -, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -, ^{18}O - and ^{85}Kr data were applied to estimate the altitude of recharge area and mean residence times of water. An acceptably consistent picture for the groundwater flow to a well was derived from single $^3\text{He}/^3\text{H}$ investigations compared to that of long-term ^3H sampling series.

Dank

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten Untersuchungsergebnisse der International Atomic Energy Agency (IAEA) genutzt werden, die uns dankenswerterweise Herr W. STICHLER (Hydrology Section) zur Verfügung stellte.

Besonderer Dank gilt den Herren Prof. H. MOSER und W. RAUERT, Institut für Hydrologie (ehemals Radiohydrometrie) der GSF Neuherberg für die Überlassung früherer Untersuchungsergebnisse zum Isotopengehalt der Grundwässer im Talbereich sowie des Inn. Die Nutzung dieser Werte versetzte uns in die Lage, aus mit Isotopenuntersuchungen kalibrierten Modellrechnungen plausible Angaben zur Verweilzeit der Grundwässer abzuleiten.

Die Beprobung der Grund- und Oberflächenwässer wurde durch Mitarbeiter der Stadtwerke Innsbruck, des Elektrizitätswerks Vomp und der Fa. Hydroisotop in Zusammenarbeit durchgeführt. In diesem Zusammenhang sind wir den Herren Dipl. Ing. D. I. QUINGER (Stadtwerke Innsbruck) und Herrn K. SINNGRÜN (Wasserwart der Stadtwerke Innsbruck) sowie Herrn J. KIRCHMAIR (Stadtwerke Schwaz) für ihr Engagement bei der Organisation von Probenahmekampagnen und für die Entnahme der monatlich zu untersuchenden Wässer verpflichtet. Für die Durchführung der Analytik, insbesondere von Umweltisotopgehalten, wie für weite Bereiche der Interpretation danken wir der Fa. Hydroisotop (Frau Dr. S. VOERKELIUS) und Frau N. KADLEC von der GSF.

Der Beitrag zur regionalen Geologie des Innsbrucker Raumes wurde von Herrn Dr. G. GASSER (Hydrogeologie und Bohrwesen GmbH, Jenbach) abgefaßt; ihm sind wir zudem für seine unermüdliche Unterstützung bei Fragen zur lokalen Hydrogeologie verpflichtet.