

# TECHNISCHER BERICHT 91-26

## URANGEHALTE VON OBERFLÄCHEN-, QUELL- UND GRUNDWÄSSERN DER SCHWEIZ

MÄRZ 1992

P. BAERTSCHI<sup>1)</sup>  
R. KEIL<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> NAGRA, 5430 Wettingen

<sup>2)</sup> Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen

Erscheint gleichzeitig als  
«Beiträge zur Geologie der Schweiz, Kleinere Mitteilungen, Lieferung 94»  
herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission.

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag der Nagra erstellt. Die Autoren haben ihre eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargestellt. Diese müssen nicht unbedingt mit denjenigen der Nagra übereinstimmen.

"Copyright (c) 1992 by NAGRA, Wettingen (Schweiz). / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Uebersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

## Urangehalte von Oberflächen-, Quell- und Grundwässern der Schweiz

P. BAERTSCHI, R. KEIL

### **Zusammenfassung**

Dieser Bericht enthält die Ergebnisse von Untersuchungen, die zwischen 1978 und 1986 in mehreren Phasen durchgeführt wurden. Sie umfassen Urananalysen von Oberflächen-, Quell- und Grundwässern der Schweiz, vor allem des alpinen Raums. Abnormal hohe U-Gehalte wurden vor allem in Gebieten mit bekannten U-Vorkommen festgestellt. Das Einzugsgebiet der Rhone ist diesbezüglich besonders interessant und bildete den Schwerpunkt der Untersuchungen. Erhöhte U-Gehalte fanden sich ferner im Vorderrheintal, wenig bis keine dagegen in den Einzugsgebieten von Reuss, Aare und Ticino. Eine grosse Variationsbreite von 0.2 bis > 100 ppb zeigen Grundwässer aus alpinen Granitkomplexen. Normale U-Gehalte um 0.5 ppb ergaben die wenigen untersuchten Oberflächenwässer aus dem Mittelland und der Nordschweiz. Grund- und Tiefenwässer der Nordschweiz (und des angrenzenden Auslandes) mit hohen U-Gehalten (> 2 ppb) wurden aus dem hydrologischen Regionalprogramm der Nagra übernommen.

Eine Interpretation der U-Gehalte ist durch mangelnde Kenntnis der verursachenden Prozesse und Parameter oft problematisch. Als Beitrag zum besseren Verständnis werden die Ergebnisse von zwei Auslaug-Experimenten wiedergegeben.

**Abstract**

This report presents the results of U-analyses in surface and groundwaters in Switzerland, which were carried out in several phases between 1978 and 1986.

Most of the water samples originate from the alpine region and unusually high U-contents were found mainly in regions with known U-mineralisations. The recharge zone of the Rhone valley is of particular interest in this respect and thus formed the focal point of the investigation programme. Some anomalies were also found in the Upper Rhine valley, but practically none in the recharge zones of the Reuss, the Aare and the Ticino.

A wide range of U-contents, between 0.2 and > 100 ppb, was found in groundwaters from alpine granitic complexes. Normal U-contents of around 0.5 ppb were measured in the few surface waters investigated in the regions of the Molasse Basin and Northern Switzerland. According to Nagra's regional hydrology programme, several deep groundwaters in Northern Switzerland and the adjoining region of the Black Forest also show enhanced U-contents (> 2 ppb) and these are included in this compilation.

In general, the interpretation of U-contents remains problematic since the processes and parameters giving rise to these contents are only poorly understood. The results of two extraction experiments, which may lead to a better understanding of the situation, are given.

## Resumé

Ce rapport présente les résultats d'investigations qui se sont déroulées en plusieurs phases entre 1978 et 1986. Elles comprennent des analyses de la teneur en uranium d'eaux superficielles, de sources et de nappes souterraines en Suisse, provenant plus particulièrement de régions alpines. C'est surtout dans les régions présentant des gisements d'U connus que l'on a rencontré des teneurs d'U anormalement élevées dans l'eau. Le bassin versant du Rhône est particulièrement intéressant à cet égard et constitua le centre de gravité des investigations. On a également trouvé des teneurs d'U élevées dans la vallée du Rhin antérieur, alors qu'elles étaient nulles ou très faibles dans les bassins versants de la Reuss, de l'Aar et du Tessin. Les eaux souterraines provenant de complexes granitiques alpins exhibent de fortes variations allant de 0.2 à > 100 ppb. Les quelques eaux de surface étudiées sur le Plateau et le nord de la Suisse montrent des teneurs normales aux alentours de 0.5 ppb. Les données relatives aux eaux souterraines profondes présentant de fortes teneurs d'U (> 2 ppb) dans le nord de la Suisse (et la région frontalière voisine) ont été tirées du programme d'investigation hydrologique régional de la Cédra.

L'interprétation des teneurs d'U est souvent problématique en raison du manque de connaissances au sujet des phénomènes et paramètres qui sont à leur origine. Les résultats de deux expériences de lixiviation sont présentés à titre de contribution à une meilleure compréhension du problème.

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b><u>Seite</u></b>
ZUSAMMENFASSUNG		I
ABSTRACT		II
RÉSUMÉ		III
INHALTSVERZEICHNIS		IV
FIGURENVERZEICHNIS		VI
TABELLENVERZEICHNIS		VII
	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Ziele und Umfang der Untersuchungen	1
1.2	Existierende Daten	2
1.3	Allgemeine Feststellungen	3
<b>2.</b>	<b>EXPERIMENTELLES</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>WÄSSER AUS DEM EINZUGSGEBIET DER RHONE</b>	<b>7</b>
3.1	Urangehalte der Rhone	7
3.2	Einzugsgebiet der Rhone	13
3.3	Wässer aus zwei U-Vererzungszonen (Wallis)	22
<b>4.</b>	<b>WÄSSER AUS ANDERN GEBIETEN DER SCHWEIZ</b>	<b>24</b>
4.1	Einzugsgebiet Vorderrhein, GR	24
4.2	Einzugsgebiet Ticino / Lago Maggiore	27
4.3	Zentralschweiz, Einzugsgebiet von Reuss und Aare (Oberlauf)	29
4.4	Nordschweiz, Einzugsgebiet Aare / Rhein	29

<b>5.</b>	<b>GRUNDWÄSSER AUS KRISTALLIN-KOMPLEXEN (ROTONDO- UND AAREGRANIT)</b>	<b>34</b>
5.1	Allgemeines	34
5.2	Wässer aus dem Furka-Tunnel (Rotondogranit und Gotthardmassiv)	34
5.3	Wässer aus dem Aaregranit	39
<b>6.</b>	<b>URAN-ANOMALIEN IN GRUNDWAESSERN DER NORDSCHWEIZ UND DES BRD- GRENZGEBIETES (AUSZUG AUS DEM HYDROCHEMISCHEN REGIONAL- PROGRAMM DER NAGRA)</b>	<b>41</b>
<b>7.</b>	<b>BEGLEITENDE LABORUNTERSUCHUNGEN</b>	<b>45</b>
7.1	Auslaugbarkeit von zwei Rotondograniten aus dem Furkatunnel	45
7.2	Löslichkeit von natürlichem Uraninit	47
<b>8.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>48</b>

**FIGURENVERZEICHNIS**

- Fig. 1 Speziation von  $UO_2^{++}$ -Komplexen als Funktion des pH bei 25°C für ein typisches Grundwasser. Nach LANGMUIR (1978) / TRIPATHI (1979).
- Fig. 2 Probenahme-Regionen gemäss Tabellen 1-9.
- Fig. 3 Urankonzentration (ppb) und elektr. Leitfähigkeit des Rhonewassers als Funktion der Distanz von der Mündung für 3 Entnahme-Serien a (1980), b (1984) und c (1985), gemäss Tabelle 1.
- Fig. 4 Einzugsgebiet Vorderrhein. Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche der Proben von Tabelle 4.
- Fig. 5 Einzugsgebiet Ticino/Lago Maggiore. Entnahmestellen und U-Gehaltsbereich der Proben von Tabelle 5.
- Fig. 6 Einzugsgebiet der Reuss (Oberlauf). Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche der Proben Z 1 - Z 11 von Tabelle 6.
- Fig. 7 Einzugsgebiet der Aare (Oberlauf). Entnahmestellen und U-Gehaltsbereich der Proben Z 13 - Z 22 von Tabelle 6.
- Fig. 8 Einzugsgebiet des Rheins, N-Schweiz. Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche der Proben Z 24 - Z 35 von Tabelle 6.
- Fig. 9 Grundwässer aus dem Furkatunnel (Rotondogranit und Altkristallin). Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche gemäss Tabelle 7.
- Fig. 10 Grundwässer mit  $[U] \geq 2$  ppb aus dem Hydrochemischen Regionalprogramm Nordschweiz und Schwarzwald (BRD) der Nagra. Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche gemäss Tabelle 9.
- Fig. 11 Extraktionsverlauf für U aus zwei Rotondograniten (Pulver) bei 20°C mit verschiedenen Wässern und 1 prozentiger  $NaHCO_3$ -Lösung.
- Beilage 1 Einzugsgebiet der Rhone. Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche der Proben von Tabelle 2.

**TABELLENVERZEICHNIS**

- Tab. 1 Wasserproben aus der Rhone
- Tab. 2 Wasserproben aus dem Einzugsgebiet der Rhone
- Tab. 3 Wasserproben aus den Gebieten der U-Vorkommen im Val de Nendaz und um Finhaut/Le Châtelard
- Tab. 4 Wasserproben aus dem Einzugsgebiet des Vorderrheins
- Tab. 5 Wasserproben aus dem Einzugsgebiet Ticino / Lago Maggiore
- Tab. 6 Wasserproben aus den Einzugsgebieten von Reuss, Aare und Rhein; Zentral- und Nordschweiz
- Tab. 7 Wasserproben aus dem Kristallin des Furka-Bahntunnels (+ Fenster Bedretto)
- Tab. 8 Wasserproben aus dem Kristallin des Aare- und Gotthardmassivs
- Tab. 9 Grundwasserproben mit  $[U] \geq 2$  ppb aus dem hydrochemischen Regionalprogramm der Nagra (N-Schweiz und Grenzgebiet BRD) und den Nagra Tiefbohrungen

## 1. EINLEITUNG

### 1.1 Ziele und Umfang der Untersuchungen

Die 1977 am Paul Scherrer Institut (PSI, damals EIR) begonnenen Untersuchungen über den U-Gehalt natürlicher Wässer in der Schweiz standen ursprünglich im Zusammenhang mit der Uranprospektion. Im Rahmen eines ersten Ueberblicks zeigten dabei Quell- und Oberflächenwässer aus Gebieten bekannter U-Vorkommen im Wallis und z.T. auch im Vorderrheintal, dass erhöhte U-Gehalte als grobe Indikation für das Vorliegen von oberflächennahen Urananreicherungen gelten können. Eine eher punktuelle Sondierung in anderen Gegenden der Schweiz lieferte mit normalen U-Gehalten in Oberflächenwässern keine Hinweise auf weitere noch unbekannte Urananreicherungen. Diese ersten Untersuchungen (bis Sommer 1980) wurden in einer internen Mitteilung des PSI zusammengefasst (P. BAERTSCHI, R. KEIL & T. LABHART, EIR TM-44-80-12) und bilden einen Teil des vorliegenden Berichts. In der Folge konzentrierten sich die Untersuchungen auf Gebiete mit besonders ausgeprägten Anomalien, so vor allem auf das Einzugsgebiet der Rhone. Nebst der Herkunft des Urans interessierte dabei vermehrt sein Transportverhalten in Grund- und Oberflächenwässern, wie es auch für den Transport von Aktiniden aus einem Lager hochradioaktiver Abfälle in die Biosphäre von Bedeutung sein kann. Hohe U-Gehalte, die weit über dem normalen Pegel von 0.1 - 1 ppb liegen, erleichtern solche Analogstudien und bieten ferner die Möglichkeit, Uran als hydrologischen Tracer für Fließwege und Mischprozesse zu benutzen. Neben den Wässern aus Gebieten mit bekannten Uranvererzungen zeigen auch viele der hier analysierten Grundwässer aus kristallinen Komplexen, sowie viele Tiefengrundwässer des hydrochemischen Regionalprogramms der Nagra ausgeprägte Anomalien. Von den letztgenannten wurden Wässer mit  $U \geq 2$  ppb ebenfalls in diese Zusammenstellung aufgenommen. Insgesamt umfasst die Untersuchung 370 Wässer (240 Oberflächen- + 130 Grundwässer) zuzüglich der erwähnten 28 Tiefengrundwässer mit erhöhten U-Gehalten aus dem Regionalprogramm der Nagra (NAGRA, 1989).

## 1.2 Existierende Daten

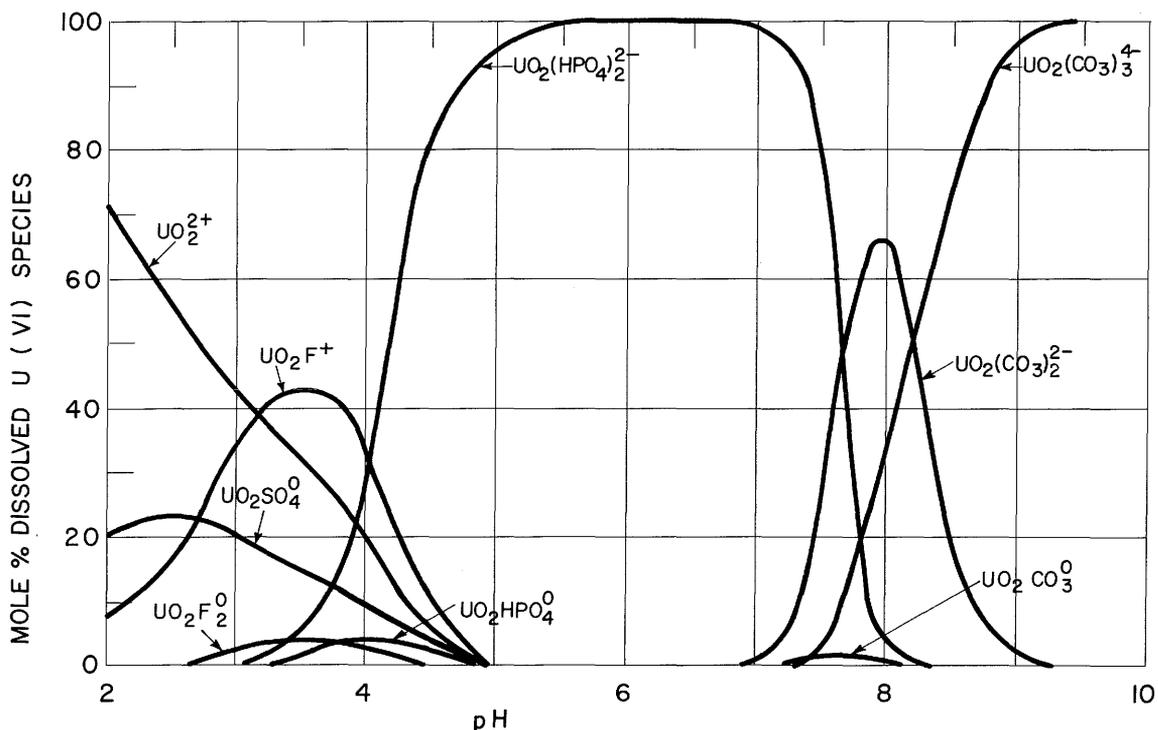
Zum U-Gehalt natürlicher Wässer in der Schweiz liegen folgende Untersuchungen vor:

BERGERIOUX et al. (1977) geben Einzelwerte für den Genfersee, BART & VON GUNTEN (1977) solche für Aare und Arve. Unabhängig von unseren Untersuchungen bestimmten DOMINIK & MANGINI (1986) U-Gehalte und  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  Aktivitätsverhältnisse im oberen Genfersee und in der Rhone nahe der Mündung. Eine umfangreichere Untersuchung im Einzugsgebiet der Rhone von SANTIAGO et al. (1989) deckt sich z.T. mit unseren Ergebnissen. BOSSHARD et al. (1991) bestimmten in einer Toxizitäts-Studie U-Gehalte in 210 Trink- und Mineralwässern. Im Rahmen des Hydrogeologischen Regionalprogramms der Nagra (NAGRA, 1989) wurden etwa 400 U-Bestimmungen in Tiefengrundwässern von 135 Probestellen der Nordschweiz und des angrenzenden Auslandes durchgeführt. Daraus wurden die Wässer mit U-Gehalten  $\geq 2$  ppb auch in diesen Bericht übernommen.

Ein wichtiger Parameter für den U-Gehalt natürlicher Wässer ist der U-Gehalt der durchflossenen Gesteine. Hierzu existieren viele Daten, die im Rahmen der U-Prospektion in den Schweizer Alpen gewonnen wurden (z.B. LABHART & RYBACH, 1974). Eine zusammenfassende Darstellung geben GILLIERON (1986) und GILLIERON & LABHART (1986).

### 1.3 Allgemeine Feststellungen

Der Gehalt natürlicher Wässer an Uran (und anderen Spurenelementen) ist das Ergebnis einer komplexen Vielfalt von Auslaug-, Lösungs- und Verdunstungs- sowie von Sorptions-, Mitfällungs- und Verdünnungsprozessen. Da Oberflächenwässer und oberflächennahe Grundwässer normalerweise ein oxidierendes Milieu darstellen liegt das Uran in seiner relativ leicht löslichen 6-wertigen Form meist als komplex gebundenes  $\text{UO}_2^{2+}$ -ion vor und kann so unter geeigneten Bedingungen recht hohe Konzentrationen - typisch bis 100 ppb, z.T. aber auch viel mehr - erreichen. Seine pH-abhängige Speziation bezüglich der wichtigsten Komplexe ist als Beispiel für ein typisches Grundwasser nach LANGMUIR (1978), korrigiert von TRIPATHI (1979), in Figur 1 wiedergegeben. Zwischen pH 4.5 und 7.5 dominiert für den betrachteten Fall der Phosphatkomplex  $\text{UO}_2(\text{HPO}_4)_2^{2-}$  und oberhalb von etwa pH 7.6 die Karbonatkomplexe  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  und  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ . Löslichkeitsgrenzen werden beim 6-wertigen Uran im Bereich normaler Konzentrationen (< 100 ppb) selten erreicht. Neben mangelndem Angebot sind es vielmehr Sorptions- und Kopräzipitationsprozesse, welche den Urangehalt natürlicher Wässer beschränken. Für die Wechselwirkung Granit/Wasser haben z.B. SZALAY & SAMSONI (1969) die limitierende Wirkung des Sorptionsgleichgewichts eindrücklich gezeigt. In vielen Fällen, besonders in nicht stagnierenden Wässern, dürften aber den U-Gehalt neben Gleichgewichten auch kinetische Effekte mitbestimmen.



**Fig. 1** Speziation von  $\text{UO}_2^{2+}$ -Komplexen als Funktion des pH bei 25°C für ein typisches Grundwasser. Komponenten:  $\Sigma \text{U (VI)} = 10^{-8} \text{ M}$  (2.4ppb),  $\text{P CO}_2 = 10^{-2.5} \text{ atm}$  (3.2 mbar),  $\Sigma \text{F} = 0.3 \text{ ppm}$ ,  $\Sigma \text{Cl} = 10 \text{ ppm}$ ,  $\Sigma \text{SO}_4 = 100 \text{ ppm}$ ,  $\Sigma \text{PO}_4 = 0.1 \text{ ppm}$ ,  $\Sigma \text{SiO}_2 = 30 \text{ ppm}$ . Nach LANGMUIR (1978) / TRIPATHI (1979).

Die Vielfalt und Komplexität der massgebenden Prozesse und Parameter, sowie das ubiquitäre Vorkommen von Uran macht im allgemeinen schon ein qualitatives Verständnis des U-Gehaltes natürlicher Wässer schwierig und eine quantitative Interpretation ist in den meisten Fällen nicht möglich. Immerhin haben die zahlreichen, meist im Rahmen der Uranprospektion durchgeführten Untersuchungen zu einigen allgemeinen Erkenntnissen geführt:

1. Bei einem U-Gehalt von  $3.3 \pm 0.2$  ppb im Meerwasser erstreckt sich der Bereich für Oberflächenwässer weltweit etwa zwischen 0.03 und 10 ppb mit einer Häufung zwischen 0.2 und 1 ppb (SCOTT, 1982; OSMOND & COWART, 1976). Gehalte  $> 10$  ppb sind selten, sehr niedrige Gehalte  $< 0.1$  ppb sind gewöhnlich an schwach mineralisierte niederschlagsähnliche Wässer gebunden (SCOTT, 1982; CAMERON & HORNBROOK, 1976).
2. Allgemeine Korrelationen des U-Gehaltes mit andern Lösungskomponenten und Parametern liegen kaum vor. In zusammenhängenden oder verwandten Fließ-Systemen kann aber eine durch Verwitterung und kongruente Auflösung U-haltiger Gesteine sowie durch Verdunstung oder Verdünnung bedingte stark positive Korrelation zum TDS-Wert bzw. zur elektrischen Leitfähigkeit vorliegen (LOPATKINA, 1964, BOROLE et al., 1982). Dabei kann die Korrelation mit einzelnen Lösungskomponenten wie z.B.  $\text{HCO}_3^-$  im Fall von Fließwässern besonders deutlich sein (MANGINI et al., 1979).
3. Hohe U-Gehalte der durchflossenen Gesteine führen in der Regel auch zu erhöhten U-Gehalten in Quell- und Oberflächenwässern (LOPATKINA, 1964). Andererseits sind Sedimente von Oberflächenwässern bezüglich Uran mit dem Wasser nur bei höheren U-Gehalten schwach korreliert (CAMERON & HORNBROOK, 1976; DALL'AGLIO 1971; ECK, 1981).
4. In Gebieten intensiver Bodennutzung kann ein gewisser (meist kleiner) Anteil des Urans in Oberflächenwässern aus den in der Regel stark U-haltigen Phosphatdüngern stammen (SPALDING & SACKETT, 1972).
5. Der U-Gehalt von oxidierenden Grundwässern liegt normalerweise im Bereich von 0.1 - 1000 ppb mit einer Häufung um 1 ppb (OSMOND & COWART, 1976). Extrem hohe Gehalte bis zu 15'000 ppb wurden von ASIKAINEN & KAHLOS (1979) in Grundwasserbohrungen (Granit) in Südfinnland festgestellt. Grundwässer aus tieferen, stark reduzierenden Bereichen (U IV) haben meist niedrige U-Gehalte  $< 0.1$  ppb. Hohe U-Gehalte im Gestein oder U-Vererzungen äussern sich in solchen reduzierenden Zonen kaum durch erhöhte U-Gehalte des Grundwassers (CRAMER et al., 1987).
6. Zusätzliche Informationen über Herkunft und Geschichte des gelösten Urans können in günstigen Fällen vor allem in Grundwässern aus dem Aktivitätsverhältnis  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  gewonnen werden (OSMOND & COWART, 1976). In Oberflächenwässern zeigt das Aktivitätsverhältnis eine kleinere Variationsbreite und ist in der Regel wenig aussagekräftig.

## 2. EXPERIMENTELLES

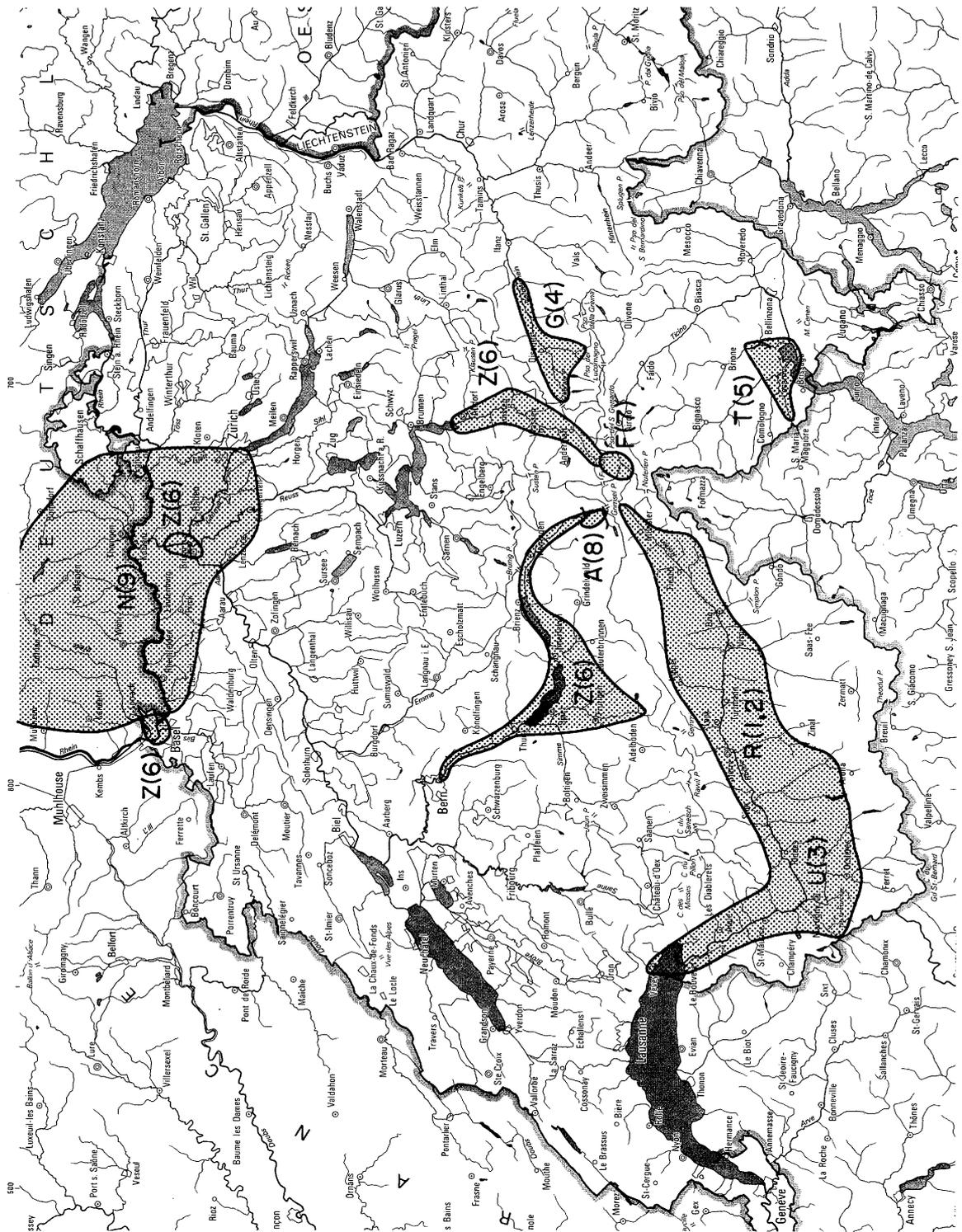
Die Entnahme der Wässer erfolgte normalerweise in 250 oder 500 cm<sup>3</sup> PE-Flaschen, die jeweils ganz gefüllt und sofort verschlossen wurden. In den meisten Fällen waren die Wässer einigermaßen klar. Beim Stehen abgesetzte Sedimente wurden vor dem Ansäuern abgesogen oder abdekantiert.

Verschiedene Tests zeigten, dass U-Gehalte im Bereich > 0.1 ppb auch durch längeres Stehen im Originalzustand nicht signifikant verändert werden. Ebenso bewirkte die Filtration durch 0.45 µm Filter keine nennenswerten Abnahmen des U-Gehaltes auch nicht in den seltenen Fällen sichtbarer Trübungen. Auf eine Filtration wurde deshalb im allgemeinen verzichtet. Für die U-Bestimmungen standen zwei von KEIL entwickelte Methoden zur Verfügung, wobei die etwas schnellere spektralphotometrische Methode (KEIL, 1979) die ebenfalls zuverlässige polarographische U-Bestimmung (KEIL, 1978) etwa ab 1979/80 ersetzte. Die gemessenen U-Gehalte sind für niedrige Werte (< 1 ppb) innerhalb von etwa 0.1 ppb, bei höheren Gehalten (> 1 ppb) meist besser als auf ± 5 % reproduzierbar und richtig. Eine höhere Empfindlichkeit und Genauigkeit wäre mit grösseren Proben und grösserem Aufwand durchaus erreichbar, für die vorliegende Untersuchung jedoch kaum nützlich, da die zu erwartenden zeitlichen Schwankungen des U-Gehaltes, besonders als Folge unterschiedlicher Wasserführung ohnehin nicht berücksichtigt werden und da vor allem das Auftreten signifikanter Anomalien interessiert.

In den meisten Fällen wurden neben dem U-Gehalt auch pH, el. Leitfähigkeit und Alkalinität bestimmt.

Einen Ueberblick über die verschiedenen Regionen der Probenahmen gibt die Karte Fig. 2.

Als Ergänzung zu den Wasseranalysen wurden zwei für die Interpretation nützliche Auslaugexperimente im Labor durchgeführt, die abschliessend beschrieben werden.



**Fig. 2** Probenahme-Regionen gemäss Tabellen 1-9. A (8) Aaremassiv, Tabelle 8; F (7) Furka (Rotondo) Tabelle 7; G (4) Graubünden, Vorderrheintal, Tabelle 4; N (9) Nagra Hydrochemisches Programm N-Schweiz, Tabelle 9; R (1,2) Rhone und Einzugsgebiet Tabellen 1 bzw. 2; T (5) Ticino/Lago Maggiore, Tabelle 5; U (3) Uranvererzungen Wallis, Tabelle 3; Z (6) Zentral- und N-Schweiz, Reuss, Aare, Rhein, Tabelle 6.

### 3. WÄSSER AUS DEM EINZUGSGEBIET DER RHONE

Die in den Tabellen 1 (Rhône) und 2 (Einzugsgebiet) wiedergegebenen Daten entstammen drei Messkampagnen, die im Herbst der Jahre 1980, 1984 und 1985 bei ähnlichen Wetterlagen und vergleichbarer, niedriger Wasserführung durchgeführt wurden und die mit a, b und c gekennzeichnet sind. Die Beprobung erfolgte bei allen drei Serien Rhonetal-aufwärts innerhalb von 2-3 Tagen. Zusätzlich wurden im Sommer 1980 bei 4-6 mal grösserer Wasserführung weitere Proben im Oberwallis entnommen, die als separate Serie d am Schluss der Tabellen 1 und 2 aufgeführt sind. Insgesamt wurden 235 Proben gemessen (168 Oberflächenwässer und 67 Quell- und Trinkwässer). Die durchgehende Numerierung enthält alle Proben der Serien a, b und c und folgt etwa der jeweiligen Probenahme-Sequenz. Zur besseren Uebersicht wurden aber alle Wasserproben aus der Rhône separat in Tabelle 1 zusammengestellt.

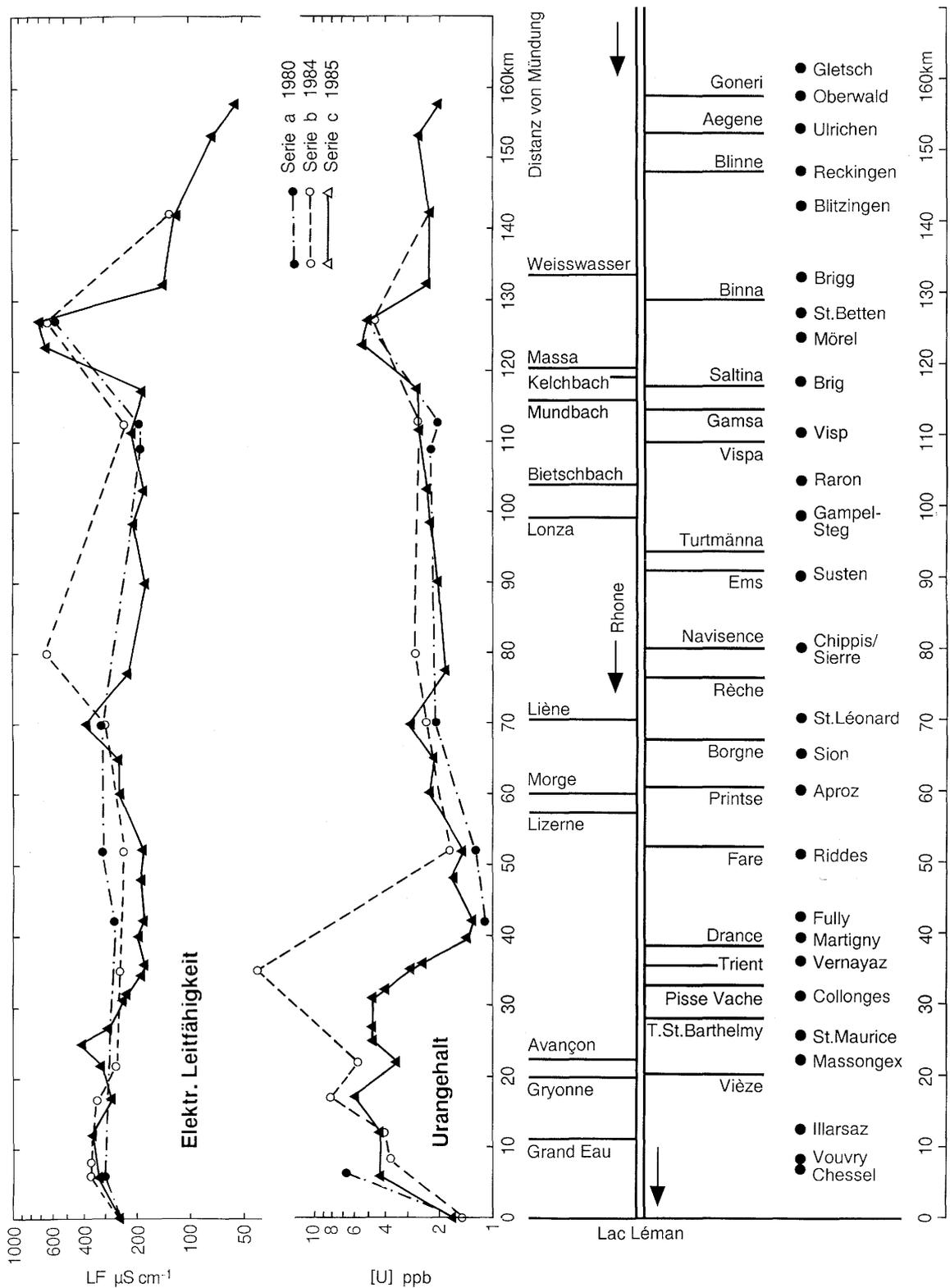
#### 3.1 Urangehalte der Rhône

Tabelle 1 gibt die Messungen an 63 Proben von 35 Messstellen längs der Rhône aus den drei Serien a, b und c wieder. Dabei ist Serie c mit 37 Proben von 30 Stellen die vollständigste Sequenz. Urangehalte und LF-Werte sind in Fig. 3 als Funktion der Distanz von der Mündung dargestellt, wobei neben wichtigeren Orten auch die grösseren Zuflüsse eingetragen sind. Die geographische Situation ist aus Beilage 1 ersichtlich.

#### **Kommentar:**

Die Rhône zeigt gemäss Figur 3 sowohl zeitliche als auch ausgesprochen starke örtliche Variationen des U-Gehaltes, der mit einem Mittelwert von 3.4 ppb (aus 62 Proben) für einen Fluss sehr hoch liegt. Das bei allen Serien a, b, c im Bereich Mörel/Betten auftretende Maximum von  $\approx 5$  ppb U ist offensichtlich gekoppelt mit einem LF-Maximum von etwa  $650 \mu\text{Scm}^{-1}$ . Für die Erhöhung des U-Gehaltes könnten neben dem Weisswasser auch kleinere ober- und unterirdische Zuflüsse aus dem relativ U-reichen Aaregranit verantwortlich sein, die wahrscheinlich auch die hohen U-Gehalte im Trinkwasser von Lax (41 ppb) und Mörel (8.5 ppb) verursachen. Die bekannten U-Vererzungen im Bereich Naters/Massaschlucht (LABHART, 1967) liegen dagegen bereits unterhalb des U-Maximums in der Rhône und stehen mit diesem kaum in ursächlichem Zusammenhang. Die Korrelation des U-Maximums mit der Leitfähigkeit könnte aber auch auf Desorptionseffekte, z.B. im Zusammenhang mit der Einleitung von Abwässern hindeuten. Der anschliessende korrelierte Abfall von U-Gehalt und Leitfähigkeit ist sicher ein Verdünnungseffekt (z.B. durch die Ausläufe der EW's zwischen Mörel und Bitsch); eine zusätzliche Reduktion des U-Gehaltes könnte aber auch durch Sorption an zugeführtem und aufgewirbeltem Schlamm erfolgen.

Eine ähnliche, aber viel weniger deutliche und auf Serie c (1985) beschränkte Situation ist bei km 70 (St Léonard) erkennbar und dürfte mit dem Zufluss der Navisence (153) zusammenhängen. Der rechtsseitige Messpunkt (150) zeigt wohl wegen ungenügender Durchmischung noch keine Erhöhung des U-Gehaltes. Die U-armen rechtsseitigen Zuflüsse wie Liène (132), Morge (121) und Lizerne (113, 114) erniedrigen den U-Gehalt der Rhône weiter bis auf Werte um 1.2 ppb bei Fully (101, 102).



**Fig. 3** Urankonzentration (ppb) und elektr. Leitfähigkeit des Rhonewassers als Funktion der Distanz von der Mündung für 3 Entnahme-Serien a (1980), b (1984) und c (1985), gemäss Tabelle 1. Angegeben sind ferner die grösstern Zuflüsse und Ortschaften.

**Tabelle 1:** Wasserproben aus der Rhone (Bezeichnung R- ; a 1980, b 1984, c 1985, d Sommer 1980)

Nr. R-	Serie	Distanz ab Lac Léman km	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
						pH	LF µScm <sup>-1</sup>	Alkal meq/l	
1	a	0	Lac Léman, Vevey, Ufer	30.10.80	1.45	7.65	257	----	
2	a	0	Lac Léman, Chillon, Ufer	30.10.88	1.47	8.45	243	----	
3	b	0	Lac Léman, Chillon, Ufer	12.11.84	1.44	8.05	261	1.60	
4	c	0	Lac Léman, Chillon, Ufer	04.11.85	1.68	8.05	236	1.55	
6	a	6.1	Chessel,Porte du Scex Brücke r.Ufer	30.10.80	6.40	7.90	298	----	Schwebfracht (s. Text)
7	b	6.1	Chessel,Porte du Scex Brücke mitte	12.11.84	4.26	7.80	360	1.65	
8	c	6.1	Chessel,Porte du Scex Brücke r.Ufer	04.11.85	4.43	7.82	340	1.60	
9	c	6.1	Chessel,Porte du Scex Brücke l.Ufer	04.11.85	4.37	7.82	331	1.60	
13	b	8.1	Vouvry l. Ufer	12.11.84	3.84	7.70	364	1.65	
17	b	12	Illarsaz r. Ufer	12.11.84	4.15	7.90	353	1.68	
18	c	12	Illarsaz r. Ufer	04.11.85	4.83	7.95	347	1.62	
24	b	17.2	Brücke St.Triphon/Collombey	12.11.84	8.23	7.80	330	1.53	
25	c	17.2	Brücke St.Triphon/Collombey r.Ufer	04.11.85	6.28	7.85	281	1.35	
31	b	22	Brücke b.Massongex, r.Ufer	12.11.84	5.80	7.80	257	1.30	
32	c	22	Brücke b.Massongex, r.Ufer	04.11.85	3.30	7.95	313	1.55	
33	c	22	Brücke b.Massongex, l.Ufer	04.11.85	3.72	7.90	303	1.53	
39	c	25	St.Maurice, Brücke, r.Ufer	04.11.85	4.91	8.22	413	2.15	
40	c	26.8	Lavey-les-Bains,Brücke,l.Ufer	04.11.85	4.96	8.55	294	1.57	
48	c	31	Collonges, Brücke, l. Ufer	04.11.85	4.93	7.95	224	1.20	
49	c	31	Collonges, Brücke, r. Ufer	04.11.85	4.59	8.00	232	1.20	
51	c	32	ca. 1 km ob Collonges, r.Ufer	04.11.85	3.91	7.95	280	1.06	
52	c	32	ca. 1 km ob Collonges, l.Ufer	04.11.85	4.02	7.95	175	1.00	
60	b	34.8	Brücke Dorenaz/Vernayaz, l.Ufer	13.11.84	21.5	7.80	250	1.32	
61	c	34.8	Brücke Dorenaz/Vernayaz, l.Ufer	04.11.85	3.91	7.90	187	1.00	
62	c	34.8	Brücke Dorenaz/Vernayaz, mitte	04.11.85	3.10	7.85	190	1.00	
63	c	34.8	Brücke Dorenaz/Vernayaz, r.Ufer	04.11.85	2.80	7.90	192	1.00	
64	c	35.8	ca. 1 km oberhalb Brücke r.Ufer	04.11.85	2.47	7.90	188	1.00	

**Tabelle 1: Fortsetzung**

Nr.	Serie	Distanz ab Lac Léman km	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
						pH	LF µScm <sup>-1</sup>	Alkal meq/l	
65	c	35.6	ca.1 km ob Mündung Le Trient l.Ufer	04.11.85	2.54	7.85	180	1.00	
74	c	39.5	Brücke Martigny/Branson, r.Ufer	04.11.85	1.45	7.95	201	1.05	
75	c	39.5	Brücke Martigny/Branson, l.Ufer	04.11.85	1.38	7.85	187	1.02	
101	a	42	Brücke b. Fully	31.10.80	1.11	7.90	265	----	
102	c	42	Brücke b. Fully, l.Ufer	04.11.85	1.30	7.90	179	1.06	
103	c	48	Brücke Saxon/Saillon, r.Ufer	04.11.85	1.74	7.90	190	1.07	
104	b	52	Brücke ob Riddes l.Ufer	13.11.84	1.76	7.90	235	1.18	
105	a	52	Brücke ob Riddes l.Ufer	01.11.80	1.22	7.90	309	----	
106	a	52	Brücke ob Riddes r.Ufer	01.11.80	1.24	7.90	320	----	
107	c	52	Brücke ob Riddes r.Ufer	04.11.85	1.44	7.90	181	1.05	
122	c	60	Brücke b. Aproz r.Ufer	05.11.85	2.28	7.80	250	1.20	
123	c	65	Brücke b. Sion l.Ufer	05.11.85	2.15	7.80	250	1.20	
124	a	70	Brücke b. St.Léonard	01.11.80	2.17	7.85	316	----	
125	b	70	Brücke b. St.Léonard	13.11.84	2.48	7.60	309	1.40	
126	c	70	Brücke b. St.Léonard l.Ufer	04.11.85	3.02	7.90	386	1.45	
143	b	70	Brücke b. St.Léonard (wie 125)	14.11.84	2.24	7.55	279	1.35	
150	c	77.5	Brücke Chalais/Noës, r.Ufer	05.11.85	1.83	7.85	218	1.20	
155	b	80	Brücke Sierre/Chippis	14.11.84	2.83	8.05	655	2.41	
167	c	90	Brücke Susten/Leuk, r.Ufer	05.11.85	2.07	7.70	176	1.08	
172	c	98.5	Brücke b.Gampel-Steg mitte	05.11.85	2.35	7.90	204	1.12	
173	c	103	Brücke Turtig/Raron, mitte	05.11.85	2.39	7.90	179	1.10	
174	c	111.5	Brücke Eyholz/Lalden, r.	05.11.85	2.67	7.90	214	1.14	
180	a	109	ob Mündung Vispa, Brücke	01.11.80	2.26	7.90	188	----	
181	b	112.6	Brücke b. Brigerbad	15.11.84	2.64	7.70	228	1.21	
182	a	112.6	Brücke b. Brigerbad	01.11.80	2.01	8.00	190	----	
194	c	117.5	Brücke Brig/Naters	05.11.85	2.74	7.95	182	1.05	

**Tabelle 1: Fortsetzung**

Nr. R-	Serie	Distanz ab Lac Léman km	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
						pH	LF µScm <sup>-1</sup>	Alkal meq/l	
195	c	123.5	Mörel ob Zufluss v.Kraftwerk	05.11.85	5.61	8.45	660	2.30	
196	a	127	unt. Seilbahnstation Betten, Brücke	02.11.80	5.35	8.30	592	----	
197	b	127	unt. Seilbahnstation Betten, Brücke	15.11.84	4.90	8.10	624	2.45	
198	c	127	unt. Seilbahnstation Betten, Brücke	05.11.85	5.07	8.45	700	2.57	
199	c	132	Brigg (b.Lax), Brücke r.Ufer	05.11.85	2.34	8.25	141	1.03	
217	b	142	ob Blitzingen, Brücke	15.11.84	2.35	7.80	127	1.06	
218	c	142	ob Blitzingen, Brücke	05.11.85	2.50	8.25	123	1.05	
221	c	153	Ulrichen, Brücke l.Ufer	05.11.85	2.76	7.70	76.5	0.57	
222	c	157.5	Oberwald ob Brücke l.Ufer	05.11.85	2.11	7.40	56.6	0.40	
224	d	127	Seilbahnstation Betten	21.07.80	1.05	7.40	188	0.77	} Zusätzliche Einzelanalysen Sommer 1980 rel.hohe Wasser- führung
225	d	133	b. Fiesch	21.07.80	0.83	7.40	118	0.53	
226	d	153	Ulrichen	21.07.80	0.67	7.00	77	0.33	
227	d	157.5	Oberwald	22.07.80	0.67	6.90	75	0.33	
228	d	157.5	Oberwald	09.08.80	0.77	7.10	28	0.20	
229	d	161	Gletsch	09.08.80	0.93	6.90	24.6	0.13	

Es folgt etwa ab Martigny ein markanter, für die drei Serien a,b,c aber recht unterschiedlicher Anstieg des U-Gehaltes, der kaum mit der Leitfähigkeit korreliert ist. Sicher steht er im Zusammenhang mit den U-reichen linksseitigen Zuflüssen (vgl. Tab. 2) wie Drance (100), Trient (67). Pisse vache/Salanfe (55) und den nur z.T. beprobten Abflusskanälen verschiedener Elektrizitätswerke (z.B. 55, 65). Möglicherweise existieren im Gebiet von Martigny/Vernayaz auch grössere Zuflüsse von U-reichen Grundwässern, für deren U-Gehalt die Trinkwasserwerte von Martigny (9 ppb) und Vernayaz (21 ppb) einen Hinweis geben.

SANTIAGO et al. (1989) fanden in Übereinstimmung mit DOMINIK & MANGINI (1986) für Porte du Scex einen saisonal bedingten Variationsbereich von 1.5 - 14.7 ppb (Mittel 3.07 ppb) bei Wasserführungen der Rhone zwischen 350 und 70 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Mittel 215.8 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>). Eine befriedigende Korrelation zwischen U-Gehalt und Leitfähigkeit ergab sich dabei nur im Bereich niedriger U-Gehalte (< 4 ppb), während hohe U-Gehalte (um 10 ppb) zwischen November und April bei ganz unterschiedlichen Wasserführungen (und Leitfähigkeiten) gemessen wurden, was auf eine davon unabhängige und stark variable Zufuhr von Uran hindeutet.

Tatsächlich konnten hier kürzlich DOMINIK et al. (1991) kurze Pulse (einige h) von U-reichem Rhonewasser (bis 15.5 ppb) mit Antikorrelation zur Leitfähigkeit feststellen und auch deren Ursache eruieren. Es handelt sich um den Abfluss aus dem Emosson-EW von La Bâtiaz (b. Martigny), das nur im Bedarfsfall arbeitet und Wasser mit hohem U-Gehalt (Messungen 90 bzw. 65 ppb) im Bereich der Drance-Mündung an die Rhone ergibt. Das Uran stammt vermutlich aus dem östlichen Sammelstollen der Emosson-EW's im Mont Blanc-Granit, wo DOMINIK et al. (1991) in Kluftwässern mittlere U-Gehalte um 500 ppb bei Maximalwerten um 1500 ppb feststellten (vgl. Abschnitt 3.2.).

Der mit 21.5 ppb zunächst unverständlich hohe U-Gehalt der Rhonewasserprobe Nr 60 b erklärt sich damit als Messwert während einer EW-Betriebsphase, denn der Zufluss in die Rhone erfolgt nur etwa 3 km oberhalb der ebenfalls linksseitigen Entnahmestelle und zudem dürfte die Durchmischung in diesem geraden Rhoneabschnitt ausgesprochen schlecht sein. Möglicherweise sind auch die gegenüber Serie c erhöhten U-Gehalte der Serie b (1984) für die weiter unten liegenden Entnahmestellen Nr 31 b und 24 b noch eine Folge dieses EW-Abflusses.

Die mittlere jährliche Zufuhr von Uran in den Genfersee durch die Rhone schätzen DOMINIK et al. (1991) auf etwa 13 t (frühere Schätzungen ca. 17 t) mit einem Anteil von rund 1/3 aus dem Mont Blanc Granit und 2/3 aus den andern, z.T. oberflächennahen U-Vererzungszonen im Einzugsgebiet der Rhone, von denen viele bekannt sind und im Rahmen der U-Prospektion näher untersucht wurden (vgl. GILLIERON, 1988; LABHART & RYBACH, 1974). Sie sind auf der Karte Beilage 1 angedeutet.

Die U-Konzentration im oberen Genfersee ist bemerkenswert konstant:  $1.51 \pm 0.11$  ppb (nach Tab. 1) und  $1.52 \pm 0.15$  ppb aus 18 Bestimmungen von DOMINIK & MANGINI (1986) an 4 uferfernen Stellen, ca. 4.5 km von der Rhonemündung und aus verschiedenen Tiefen (bis 185 m) zwischen Februar und September 1982.

Die Hydrologie des Rhonetals und der Chemismus des Rhonewassers sind stark anthropogen beeinflusst, was sich auch auf den Verlauf der U-Gehalte auswirken dürfte. So wird die Rhone neben den natürlichen Zuflüssen durch die Abflüsse zahlreicher Kraftwerke gespiesen, deren U-Gehalt nur in wenigen Fällen erfasst wurde. Der

Chemismus des Rhonewassers wird durch die dichte Besiedlung und Industrialisierung des Rhonetals stark beeinflusst. Ausdruck dafür ist die örtlich sehr variable Leitfähigkeit, mit der auch die Alkalinität gut korreliert ( $r = 0.96$ ). Der U-Gehalt ist insgesamt mit der Leitfähigkeit (als grobes Mass für den Totalgehalt an gelösten Stoffen) nur schwach korreliert ( $r = 0.47$  alle Proben,  $r = 0.62$  für Serie c). Im Rhone-Oberlauf allein, zwischen km 90 (Leuk) und km 157,5 (Oberwald) ist dagegen die Korrelation mit  $r = 0.96$  ausgezeichnet und deutet auf einen im wesentlichen gleichen Ursprung der beiden Parameter bei der Auslaugung der Gesteine. Die etwa 3-5 mal niedrigeren U-Gehalte der Probenserie d sind die Folge einer etwa 5 mal höheren Wasserführung an diesen Entnahmedaten (Hydrolog. Jahrbuch, 1980). Im Oberlauf der Rhone erfolgt die U-Zufuhr vor allem durch die rechtsseitigen Zuflüsse aus dem Aarmassiv, unterhalb etwa km 95 sind dagegen die linksseitigen Zuflüsse für die U-Anomalien in der Rhone verantwortlich. Die Durchmischung ist aber doch so gut, dass für diesen unteren Abschnitt die linksufrigen U-Gehalte im Durchschnitt nur um 0.25 ppb über den entsprechenden rechtsufrigen Werten liegen.

Für Probe Nr. 6 (Porte du Scex) wurde auch der durch die Schwebefracht zusätzlich transportierte Anteil an Uran bestimmt. Mit 11.4 mg/l abzentrifugiertem und getrocknetem Schlamm mit 37 ppm U ergab sich ein Anteil von 0.42  $\mu\text{g/l}$  oder 6.6 % des in Lösung transportierten Urans (6.4 ppb). Die Schwebefracht enthält viel organische Stoffe und sorbiert Uran stark. Aus obigen Zahlen ergibt sich ein Verteilungskoeffizient von  $R_D = 5800$  ml/g. Werte gleicher Grössenordnung wurden von BARTH & VON GUNTEN (1977) für die Aare sowie auch von ECK (1981) für organische Bachschlämme und von SZALAY (1964) für huminsäurehaltige Feststoffe (z.B. Torf) gemessen. Von den häufigeren anorganischen Schwebestoff- und Schlammkomponenten haben vor allem Eisenhydroxide ein hohes Sorptionsvermögen für  $\text{UO}_2^{++}$  mit  $R_D$ -Werten um  $10^4 - 10^6$  ml/g, während z.B. Tone oder Karbonatschlämme weniger wirksam sind. In Oberflächenwässern, vor allem in solchen die anthropogen verunreinigt werden wie die Rhone, sind sowohl Sorptions- als auch Desorptionsprozesse in wechselndem Ausmass wirksam, die den Gehalt an gelöstem  $\text{UO}_2^{++}$  verändern können. Eine Erhöhung wäre auch als Folge des natürlichen Abbaus organischer Schwebstoffe zu erwarten. Auf jeden Fall ist die Schlammfracht von Fließwässern für den U-Gehalt und seine Variationen von erheblicher Bedeutung. Der hohe Urangehalt der Rhone und seine grossen zeitlichen und örtlichen Schwankungen wären im Prinzip eine geeignete Basis, um zu weiteren Erkenntnissen über das Verhalten von Uran (als löslichstes Aktinid) in einem relativ stark belasteten Flusslauf zu gelangen.

### 3.2 Einzugsgebiet der Rhone

Tabelle 2 enthält 160 Proben der vergleichbaren Serien a), b), c) und 6 Proben (Serie d) vom Sommer 1980. Es handelt sich um 103 Oberflächenwasser sowie um 63 Trink-Brunnen- und Quellwässer, welche die lokalen Grundwässer repräsentieren. Entnahmestellen und Bereiche der U-Gehalte sind in der Karte Beilage 1 wiedergegeben.

**Tabelle 2:**

**Wasserproben aus dem Einzugsgebiet der Rhone (Bezeichnung R- ; a 1980, b 1984, d Sommer 1980**  
 O Oberflächenwasser, Q Quellwasser, T Trinkwasser)

Nr.	Serie	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	Analysendaten				Bemerkungen
					[U] ppb	pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l	
R-5	b	O	"Eau Froide", Villeneuve, ob Brücke	12.11.84	0.62	7.70	463	3.50	
10	b	T	Porte du Scex, Haus bei Brücke,l.	12.11.84	0.19	8.00	239	2.50	
11	b	O	"Le Tové" südl. v. Les Evouettes	12.11.84	0.54	8.40	728	2.41	
12	b	O	"Le Fossau" b. Vouvry, Mündung	12.11.84	0.15	7.60	294	2.43	
14	b	T	Vouvry, Brunnen	12.11.84	0.26	8.10	272	2.77	
15	a	O	"L'Avançon",Brücke zw. Vouvry/Vionnaz	30.10.80	0.43	8.55	265	----	
16	b	O	"L'Avançon",Brücke zw. Vouvry/Vionnaz	12.11.84	0.20	8.50	309	3.00	
19	b	O	"Grande Eau", Brücke vor Aigle	12.11.84	0.37	8.40	515	2.55	
20	b	O	"Grande Eau", Brücke nach Aigle	12.11.84	0.35	8.30	489	2.55	
21	b	T	Aigle, Brunnen b. "Commune"	12.11.84	0.20	7.80	404	3.30	
22	b	T	Ollon Brunnen b. "Commune"	12.11.84	0.75	8.10	581	2.58	
23	b	T	St.Triphon-Gare	12.11.84	0.68	8.10	577	2.55	
26	a	O	"La Vièze", Monthey, Holzbrücke	31.10.80	0.27	8.45	382	----	
27	b	O	"La Vièze", Monthey, Holzbrücke	12.11.84	0.29	8.30	566	2.86	
28	b	T	Monthey, Brunnen b. Holzbrücke	12.11.84	0.37	7.90	427	3.97	
29	a	T	Troistorrent (Val d'Illiez), Brunnen	31.10.80	0.36	7.90	390	----	
34	b	O	"La Gryonne" Strasse Bex/Ollon	12.11.84	1.03	8.20	1382	2.43	
35	a	T	Bex, Trinkwassernetz	31.10.80	0.25	8.00	419	----	
36	a	O	"L'Avançon",oberh.Saline Bex	31.10.80	0.45	8.40	404	----	
37	b	T	St.Maurice, Hotel Dent du Midi	12.11.84	1.21	7.80	456	2.85	
38	b	O	"Le Mauvoisin" ob St.Maurice	12.11.84	0.22	8.40	294	2.76	
41	a	O	"Torrent de St.Bartélemy" b. La Rasse	31.10.80	1.02	8.45	313	----	
42	b	O	"Torrent de St.Bartélemy" b. La Rasse	13.11.84	1.67	8.30	415	2.27	
43	b	O	"Torrent de St.Bartélemy" im Bois Noir	12.11.84	1.71	8.30	412	2.24	
44	b	O	"Le Courset" b. Lavey	13.11.84	0.51	8.40	456	3.75	
45	b	T	Lavey les Bains, Kurzentrum	13.11.84	4.79	7.90	206	1.88	

**Tabelle 2: Fortsetzung**

Nr.	Serie	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
						pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l	
46	b	Q	Lavey les Bains, Kurzentr. Thermalw.	13.11.84	0.26	7.80	1728	1.28	
47	b	O	"L'Avançon", Strasse Lavey/Morcles	13.11.84	2.33	8.30	283	2.66	
50	c	O	Kanal b. Collonges	04.11.85	10.1	8.15	435	3.53	
53	c	O	Bach (Kanal) b. La Balmaz	04.11.85	1.91	8.15	132	1.30	
54	a	O	Cascade "Pisse Vache" b. Miéville	31.10.80	5.25	8.10	106	----	
55	b	O	Cascade "Pisse Vache" b. Miéville	13.11.84	8.52	8.05	114	1.0	
56	b	T	Vernayaz (Volvo Garage)	13.11.84	20.9	7.80	109	0.78	
57	c	T	Vernayaz (Bahnhof)	04.11.85	20.5	7.80	91	0.75	
58	a	O	"Le Trient" Gorge de Trient (b.Vernayaz)	31.10.80	3.50	8.00	144	----	Sediment 3.9ppm U
59	b	O	"Le Trient" Gorge de Trient (b.Vernayaz)	13.11.84	3.67	8.05	160	1.26	
66	c	O	EW-Kanal unterh. Mündung Le Trient	04.11.85	10.1	7.55	64.7	0.58	
67	c	O	"Le Trient" b. Mündung	04.11.85	4.13	8.20	151	1.20	
68	c	O	Kanal oberh. Le Trient	04.11.85	2.43	7.90	471	2.90	
69	b	T	Martigny, Bahnhof	13.11.84	10.3	7.40	81	0.71	
70	c	T	Martigny, Bahnhof	04.11.85	8.85	7.45	62.5	0.57	
71	b	T	Martigny, Bahnhof, Brunnen	13.11.84	8.37	7.40	76	0.56	
72	a	T	Martigny, Brunnen b. Migros	31.10.80	7.24	7.50	63	----	
73	b	T	Martigny, Brunnen b. Migros	13.11.84	8.1	7.40	72	0.73	
76	c	O	Bach (Kanal)b.Branson (aus Stollen)	04.11.85	3.96	7.75	428	2.70	
77	b	Q	Col La Forclaz, Quell-Ausfluss	13.11.84	2.44	7.80	93	0.93	
78	b	T	Trient, Brunnen b. Hotel Glacier	13.11.84	5.14	7.80	294	0.92	
79	b	O	"Le Trient" ca.1 km ob Trient	13.11.84	3.67	8.20	250	1.58	
80	b	O	Zufluss zu Le Trient (aus Rohr) b. 79 l.	13.11.84	1.06	8.10	250	2.44	
81	b	O	Zufluss zu Le Trient (aus Rohr) b. 79 r.	13.11.84	5.03	7.80	294	0.93	
82	b	O	"Eau Noire", unterh. Le Châtelard	13.11.84	3.21	8.00	183	1.65	
83	b	T	Le Châtelard Village, Bahnhof	13.11.84	8.87	8.30	95.6	0.86	
84	b	T	Le Châtelard Front, Brunnen b. Bahnhof	13.11.84	9.09	8.20	95.6	0.86	

**Tabelle 2: Fortsetzung**

Nr.	Serie	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
						pH	LF µScm <sup>-1</sup>	Alkal meq/l	
85	b	O	"Le Besson", Strasse unterh.Finhaut	13.11.84	4.00	7.50	47	0.41	
86	b	T	Finhaut, Brunnen b. Bahnhof	13.11.84	3.80	7.90	47	0.40	vgl.U-24, Tab. 3
87	b	Q	Quelle aus Kalk Str. Finhaut/Emosson	13.11.84	0.13	7.10	97	0.61	
88	b	T	Brunnen, Str. Finhaut/Emosson	13.11.84	3.73	7.90	45	0.40	vgl.U-23, Tab. 3
89	b	O	Bach b. La Lechère ob Finhaut	13.11.84	0.15	7.30	33	0.23	
90	b	T	Brunnen "S.Barbera Martigny" ob Finhaut	13.11.84	3.69	7.90	46	0.39	
91	a	O	"Drance"ob Bovernier, ~ 8 km ob Martigny	31.10.80	3.58	8.15	279	----	Sediment 0.5ppm U
92	b	O	"Drance"ob Bovernier, ~ 8 km ob Martigny	13.11.84	5.74	8.40	382	2.21	
93	a	O	"Drance de Bagne" b. Le Châble	31.10.80	0.86	7.80	281	----	Sediment 0.34ppm U
94	b	O	"Drance de Bagne" b. Le Châble	13.11.84	2.48	7.70	371	2.25	
95	a	O	"Drance d'Entremont"~ 1.5 km ob Sembrancher	31.10.80	4.16	8.30	434	----	
96	b	O	"Drance d'Entremont"~ 1.5 km ob Sembrancher	13.11.84	4.94	8.30	441	3.17	
97	b	O	"Drance de Ferret" ob Zufluss v.98	13.11.84	8.43	8.20	302	1.91	
98	b	O	"Drance d'Entremont" ob Zufluss v.97	13.11.84	2.57	8.40	471	2.47	
99	b	O	Bach v.Champex b. Mündung in Le Borgeau	13.11.84	6.57	7.50	65	0.50	
100	b	O	"Drance", Martigny, Holzbrücke	13.11.84	4.11	8.10	353	2.09	
108	b	O	"La Fare", Riddes, b. Mündung	01.11.80	5.77	8.45	693	----	
109	b	O	"La Fare", Riddes, b. Mündung	13.11.84	6.57	7.50	673	2.49	
110	b	O	kl.Wasserfall unterh.Fey, Str.Riddes/Aproz	13.11.84	9.55	8.20	1103	3.26	
111	b	O	Bach v.Fey, Str. Riddes/Aproz	13.11.84	7.33	8.20	993	3.30	
112	a	O	Bach (Nr. 111) unterhalb Fey	01.11.80	5.34	8.45	765	----	
113	c	O	"La Lizerne" b. Ardon	04.11.85	0.74	8.15	501	2.40	
114	a	O	"La Lizerne" b. Ardon	01.11.80	0.32	8.50	324	----	
115	a	O	"La Printse" ob Aproz	01.11.80	2.25	8.05	393	----	
116	b	O	"La Printse" ob Aproz	13.11.84	3.07	8.20	393	2.01	
117	a	T	Aproz, Brunnen "1901"	01.11.80	5.43	8.05	467	----	
118	b	T	Aproz, Brunnen "1901"	13.11.84	7.33	7.80	574	2.74	

**Tabelle 2:** Fortsetzung

Nr.	Serie	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
						pH	LF µScm <sup>-1</sup>	Alkal meq/l	
119	b	O	Bächlein v.Baar, Str.Aproz/Sion	13.11.84	17.0	8.20	1434	3.87	
120	b	O	kl.Wasserfall ~ 3.5 km ob Aproz b.Str.n.Sion	13.11.84	14.7	8.50	640	4.26	
121	a	O	"La Morge" b. Conthey	01.11.80	0.15	8.50	307	----	Sediment 0.25 ppm U
127	a	T	Sion, Hotel Bahnhof	01.11.80	2.00	8.10	368	----	
128	b	T	Sion, Hotel Le Castel	14.11.84	3.69	7.90	538	3.63	
129	b	T	Bramois, Brunnen	14.11.84	4.41	7.75	482	3.70	
130	a	T	St.Léonard, Brunnen	01.11.80	2.47	7.80	482	----	
131	b	T	St.Léonard, Brunnen	13.11.84	6.74	7.90	588	3.70	
132	b	O	"La Liène" b. St.Léonard	13.11.84	0.64	8.20	522	3.83	
133	a	O	"La Borgne" b. Mündung	01.11.80	3.28	8.35	617	----	Sediment 0.5ppm U
134	b	O	"La Borgne" b. Bramois	14.11.84	2.55	8.20	515	2.10	
135	b	T	Vex, Val d'Hérence, Brunnen	14.11.84	1.56	7.70	557	4.63	
136	b	O	"La Dixence" vor Euseigne	14.11.84	2.28	8.20	408	2.15	
137	b	T	Euseigne, Turnhalle	14.11.84	0.55	8.00	121	1.30	
138	b	O	"La Borgne" Pont noir de Lugnere	14.11.84	2.37	8.20	555	2.07	
139	b	O	"La Borgne de Ferpecel" b. Les Haudères	14.11.84	0.59	7.90	129	1.30	
140	b	O	"La Borgne d'Arolla" b. Les Haudères	14.11.84	1.16	8.05	175	1.25	
141	b	T	Les Haudères, Garage	14.11.84	0.02	8.00	177	1.20	
142	b	T	Evolène, Brunnen	14.11.84	0.02	8.10	178	1.20	
144	b	O	"Derochia" zw.Grône u. Parmagnon	14.11.84	1.25	8.10	448	1.65	
145	b	T	Grône, Brunnen	14.11.84	1.15	8.00	263	3.53	
146	b	T	Réchy, Brunnen	14.11.84	6.85	7.65	518	2.57	
147	a	T	Réchy, Brunnen	01.11.80	6.02	8.00	484	----	
148	b	O	"La Rèche" in Réchy	14.11.84	1.60	8.20	449	1.70	
149	a	O	"La Rèche" in Réchy	01.11.80	1.45	8.30	467	----	
151	a	O	"La Navisence", Chippis b. Alusuisse	01.11.80	10.43	8.50	772	----	
152	b	O	"La Navisence", Chippis b. Alusuisse	14.11.84	10.7	8.30	802	2.45	

Tabelle 2: Fortsetzung

Nr.	Serie	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	Analysendaten				Bemerkungen
					[U] ppb	pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l	
R-									
153	c	O	"La Navisence", Chippis b. Alusuisse	05.11.85	11.4	8.40	846	2.65	
154	b	T	Chippis, Opel Garage	14.11.84	6.08	7.85	802	3.57	
156	b	T	Vissoie, Val d'Anniviers, Brunnen	14.11.84	0.64	7.80	103	1.02	
157	b	O	"Torrent des Moulins" ob Vissoie	14.11.84	0.68	8.00	132	1.48	
158	b	O	"La Gougra" ob Mission (Pt. 1261 m)	14.11.84	0.53	7.90	174	1.45	
159	b	O	"La Navisence" vor Zufluss v. 158	14.11.84	1.27	8.20	229	1.97	
160	b	T	Mission, Brunnen	14.11.84	1.34	8.20	177	1.55	
161	b	T	Grimentz, Holzbrunnen	14.11.84	1.12	8.10	158	1.30	
162	b	T	Grimentz, Brunnen aus Stein	14.11.84	1.05	8.05	159	1.32	
163	b	O	"La Freinze" ob Grimentz	14.11.84	0.97	8.00	143	1.13	
164	b	O	"Torrent du Marais" Grimentz	14.11.84	0.70	8.15	168	1.28	
165	b	O	Bach b. St.Jean, Strasse	14.11.84	0.82	8.40	238	2.20	
166	c	T	Susten, Hotel Susten	04.11.85	2.65	7.90	124	1.08	
168	b	O	Bach "Ems" b. Agarn	14.11.84	8.45	8.20	502	1.97	
169	b	O	Turtmann, Ausfluss EW	14.11.84	0.86	8.00	127	1.05	
170	a	O	"Turtmäna", Turtmann, Brücke	01.11.80	1.06	8.10	117	----	
171	b	T	Turtmann, Brunnen	14.11.84	6.17	8.00	467	2.96	
175	b	T	Visp Brunnen b. Migros	14.11.84	9.05	8.00	150	1.36	
176	b	O	"Vispa" b.Neubrück ~4.5 km ob Visp	14.11.84	1.03	7.60	126	0.73	
177	b	O	"Beiter-Bach" b.Neubrück	14.11.84	2.53	8.30	357	2.94	
178	b	T	Stalden, Hotel Burgener	14.11.84	0.92	8.40	157	1.30	
179	a	O	"Vispa" b.Staldenried	01.11.80	1.90	7.95	183	----	
183	b	T	Brigerbad, Brunnen	15.11.84	11.1	7.75	191	1.14	
184	b	Q	Brigerbad, Thermalwasser	15.11.84	12.5	7.90	185	1.05	
185	b	O	"Gamsa" vor Gamsen	15.11.84	3.70	4.05	948	----	
186	b	T	Brig, Bahnhof	15.11.84	3.45	7.50	120	0.90	
187	a	T	Brig, Hotel Schloss	02.11.80	2.85	9.10	221	----	

**Tabelle 2: Fortsetzung**

Nr.	Serie	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
						pH	LF µScm <sup>-1</sup>	Alkal meq/l	
188	b	O	"Saltina" ob Brig, Napoleonbrücke	15.11.84	1.01	7.95	235	1.34	
189	a	O	"Saltina" ob Brig, Napoleonbrücke	02.11.80	0.97	8.20	239	----	Sediment 0.34ppm U
190	a	O	"Kelchbach" Naters	02.11.80	3.03	7.55	125	----	
191	b	O	"Kelchbach" Naters	15.11.84	4.85	7.80	133	0.87	
192	a	O	"Massa" ob Naters, vor Mündung	02.11.80	2.19	7.95	190	----	
193	b	T	Mörel, Brunnen b. Konsum	15.11.84	8.50	7.70	474	2.37	
200	b	O	Bach von Grenchols, ca. 1 km ob Betten	15.11.84	2.35	8.05	1294	2.62	
201	b	T	Lax, Dorfbrunnen	15.11.84	41.2	7.95	182	1.68	
202	c	T	Lax, Dorfbrunnen	05.11.85	42.2	8.10	176	1.65	
203	c	O	Gebiet "Brunne" ob Lax, Quellbach	05.11.85	5.30	7.85	104	0.85	
204	b	O	"Weisswasser" Fieschertal vor EW	15.11.84	4.85	7.55	109	0.67	
205	a	O	"Weisswasser" Fieschertal vor EW	02.11.80	3.57	7.90	99	----	Sediment 3.9ppm U
206	b	O	Fieschertal, Auslauf EW	15.11.84	2.13	7.25	56	0.93	
207	b	Q	Fieschertal EW, Quelle am Boden	15.11.84	0.77	7.32	112	0.63	
208	b	T	Fieschertal, Brunnen	15.11.84	7.05	7.55	107	0.67	
209	a	T	Nieder-Ernen, Brunnen	02.11.80	0.52	7.90	60	----	
210	a	O	"Milibach" ob Ernen	02.11.80	1.27	8.25	151	----	
211	a	T	Ernen, Dorfbrunnen	02.11.80	0.54	7.95	59	----	
212	a	T	Binn, Trinkwasser	02.11.80	0.11	8.15	173	----	
213	a	O	"Binna" in Binn	02.11.80	0.79	8.15	173	----	
214	a	O	Zufluss zu Binna b. Schärtmoos	02.11.80	6.36	8.25	1779	----	
215	a	O	"Lonza" ob Wiler, Lötschental	02.11.80	0.49	7.80	93	----	
216	a	O	"Tennbach" ob Tennersteg, Lötschental	02.11.80	1.45	8.00	122	----	
219	b	T	Reckingen, Brunnen	15.11.84	2.11	7.70	108	0.98	
220	b	T	Ulrichen, Brunnen	15.11.84	0.57	7.60	106	0.78	
223	b	T	Oberwald, Bahnhof	15.11.84	2.02	7.50	80.1	0.71	

Tabelle 2: Fortsetzung

Nr.	Serie	Typ	Entnahmestelle	Entnahmedatum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
						pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l	
230	d	O	Massa ob Naters, vor Mündung	21.07.80	0.83	7.5	154	0.60	} zusätzliche Einzelanalysen Sommer 1980 hohe Wasser- führung
231	d	T	Bodmen b. Bellwald	25.07.80	1.37	7.1	132	0.60	
232	d	O	"Blinne" b. Reckingen	21.07.80	0.83	7.9	235	1.23	
233	d	O	"Aegine" b. Ulrichen	21.07.80	0.38	7.4	191	0.53	
234	d	O	"Goneri" b. Oberwald	22.07.80	0.38	6.8	46	0.20	
235	d	O	"Goneri" b. Oberwald	09.09.80	0.34	7.1	19	0.13	

**Kommentar:**

Die Wässer im Einzugsgebiet der Rhone zeigen viele Anomalien mit z.T. hohen U-Gehalten. Im untersten Abschnitt zwischen Genfersee und St. Maurice wurden von uns weder bei Oberflächen- noch bei Trinkwässern erhöhte U-Gehalte ( $[U] \geq 2$  ppb) gefunden. SANTIAGO et al. (1989) stellten hier solche nur in Grundwässern der Rhone-Ebene fest, die vermutlich mit der Rhone kommunizieren (3 Kiesgruben, Entwässerungskanäle). Die Anomalien beginnen flussaufwärts auf beiden Talseiten etwa im Bereich ab Lavey les Bains (45, 47, 50) / La Rasse (43, 53, 54, 55). Die z.T. sehr hohen linksseitigen Anomalien im Bereich Vernayaz/Martigny (56 - 73) können mit den bekannten U-Vorkommen im Aiguille Rouge Massiv (Châtelard-Finhaut-Salvan) und den hohen U-Gehalten im Mont Blanc-Granit in Verbindung gebracht werden. Fast alle Wässer im Einzugsgebiet von Eau Noire und Trient (82 - 90) haben hohe U-Gehalte, aber auch im oberen Trient-Tal, wo keine U-Vererzungen bekannt sind, scheint dies die Norm zu sein (77 - 81). Das Uran könnte hier aus dem Mont Blanc-Granit stammen, aus dem es sich nach LABHART & RYBACH (1974) und nach den Befunden von DOMINIK et al. (1991) und DUBOIS & PARRIAUX (1990) besonders leicht mobilisieren lässt. Im Oststollen der Emosson-Kraftwerke fanden diese Autoren ergiebige Kluftwässer mit enorm hohen U-Gehalten bis zu 2000 ppb, und ähnlich hohe Gehalte wurden von DUBOIS & PARRIAUX (1990) auch in den Wässern aus dem etwa 20 km entfernten Mont Blanc Strassentunnel gemessen. Wahrscheinlich hat auch das Uran im Grundwasser um Martigny/Vernayaz seinen Ursprung im Mont Blanc Granit.

Die "Drance" (91, 92, 100) bezieht ihr Uran vor allem von der Drance de Ferret (97) aber auch die Drance d'Entremont (95, 98) und Drance de Bagne (93, 94) liefern Beiträge, die alle mit bekannten U-Anreicherungen in Beziehung gebracht werden können: Diffuse U-Anreicherungen am Ostrand des Mont Blanc Massivs, Val Ferret; Anomalien bei Bourg-St.Pierre, Val d'Entremont (DE QUERVAIN, 1973) und die dem Val de Bagne benachbarten U-Vorkommen vom Col des Mines. Auch "La Fare" (108, 109), "La Printse" (115, 116), sowie verschiedene kleinere Bäche in diesem Bereich (110, 111, 119, 120), entwässern ein Gebiet mit vielen U-Vorkommen (Isérables, Col des Mines, Val de Nendaz, Siviez) und haben entsprechend hohe U-Gehalte. Nebst dem Grundwasser von Aproz (117, 118) haben auch die dortigen Mineralquellen hohe U-Gehalte zwischen 15 und 50 ppb (Messungen 1978 - 1980 an käuflichem Aproz Mineralwasser).

Zum Uran der "Borgne" (133, 134) tragen Dixence (136) und Borgne (138) etwa gleich bei. Im Oberlauf ob Haudères verschwindet aber die Anomalie ganz (139, 140). Die Grundwässer im Val d'Hérens (135, 137, 141, 142) haben niedrige U-Gehalte. Die "Rèche" (148, 149) gibt kaum Hinweise auf die schwachen Uran-Anomalien am Mont Noble in ihrem Einzugsgebiet, dagegen hat das Grundwasser in Réchy den typisch hohen Pegel.

Der sehr hohe und relativ konstante U-Gehalt der Navisence in Chippis um 11 ppb (151, 152, 153) ist z.Z. schwer verständlich, da ca. 12 km flussaufwärts keine Anomalie mehr vorliegt (158, 159) und auch alle anderen untersuchten Fliess- und Grundwässer oberhalb Vissoie (ca. 7 km ob Chippis) keine Anomalien zeigen (156 - 165). Wo und wie zwischen Mission und Chippis die Mineralisierung stattfindet, bei der neben dem U-Gehalt auch die Leitfähigkeit des Navisence-Wasser stark zunimmt, ist nicht bekannt. Die Situation erinnert stark an den U-Gehalt/Leitfähigkeit-Anstieg in der Rhone bei

Mörel/Betten, nur dass der hier beobachtete anschliessende Abfall in der Navisence nicht stattfindet. SANTIAGO et al. (1989), die den Effekt ebenfalls fanden, vermuten auf Grund der Aehnlichkeit der Wässer von Navisence und La Fare eine Mineralisierung über ein unbekanntes U-Vorkommen zwischen Mission und Chippis von der Art derjenigen südlich von Isérables. Eine ähnliche Mineralisierung könnte auch für die "Ems" (168) in ihrem Einzugsgebiet vorliegen. Dagegen zeigen weder Turtmänna noch Vispa hohe U-Gehalte und die U-Vorkommen von St.Niklaus-Embd-Zeneggen (vgl. GILLIERON, 1988) äussern sich in der Vispa kaum. Dagegen sind die entsprechenden Grundwässer im Rhonetal zwischen Turtmann und Brig fast durchgehend stark U-haltig.

Talaufwärts, etwa ab Brigerbad (183, 184), verschieben sich die Uran-Anomalien auf die rechte Talseite und dürften ihren Ursprung hier im Aarmassiv haben. Beträchtlich sind die U-Gehalte von Kelchbach (191) und Weisswasser (204) und vor allem der Grundwässer im Gebiet von Mörel (193), Lax (201, 202) und Fieschertal (208). Ein Bezug zu U-Anreicherungen wie sie im Gebiet von Naters bekannt sind (GILLIERON, 1988) ist wahrscheinlich. Im oberen Rhonetal beschränken sich etwas erhöhte U-Gehalte auf einige Grundwässer (219, 223) und das Aarmassiv scheint hier wenig Uran abzugeben.

### 3.3 Wässer aus zwei U-Vererzungszonen (Wallis)

Tabelle 3 enthält 14 Wässer aus dem Gebiet der U-Vorkommen Col des Mines-Nendaz (Einzugsgebiet "La Fare" und "La Printse") und 10 Wässer aus dem Gebiet Le Châtelard-Finhaut (Einzugsgebiet "Le Trient"). Die Proben wurden 1978/79 von Dr. T. LABHART gesammelt in der Hoffnung, auch in einem lokal sehr begrenzten Umfeld Einflüsse von U-Anreicherungen auf den U-Gehalt von durch- oder ausfliessenden Wässern zu finden. Weitere 9 Proben aus dem Gebiet Finhaut/Châtelard sind in Tabelle 2 enthalten (R82 - 90). Die Lage der beiden U-Vererzungszonen ist aus Beilage 1 ersichtlich.

#### **Kommentar:**

Diese frühe Untersuchung zeigte, dass direkte Beziehungen zwischen diskreten Mineralisationszonen und U-Gehalten von Wässern in ihrer unmittelbaren Umgebung kaum existieren. Immerhin aber zeigen die Wässer beider Uranbezirke qualitativ die zu erwartenden, erhöhten U-Gehalte. Im Mittel ergeben sich für die 14 Wässer von Col des Mines-Nendaz  $6.7 \pm 4.8$  ppb (bei LF =  $200 \pm 168 \mu\text{Scm}^{-1}$ ) und für die 10 Wässer von Châtelard-Finhaut  $2.5 \pm 1.7$  ppb (bei LF  $54 \pm 29 \mu\text{Scm}^{-1}$ ). Diese Werte sind gemäss Tabelle 2 mit den U-Gehalten der entsprechenden Vorfluter "La Fare" (5.8 ppb, 108) und "Le Trient" (3.5 - 4.1 ppb, 58, 59, 67) trotz der ganz verschiedenen Entnahmezeitpunkte durchaus vergleichbar, und die Annahme eines Zusammenhangs mit den oberflächennahen U-Vererzungen im Einzugsgebiet wird damit erhärtet.

**Tabelle 3: Wasserproben aus den Gebieten der U-Vorkommen im Val de Nendaz und um Finhaut/Le Châtelard.  
(Bezeichnung U- ; O Oberflächenwasser, Q Quellwasser, T Trinkwasser)**

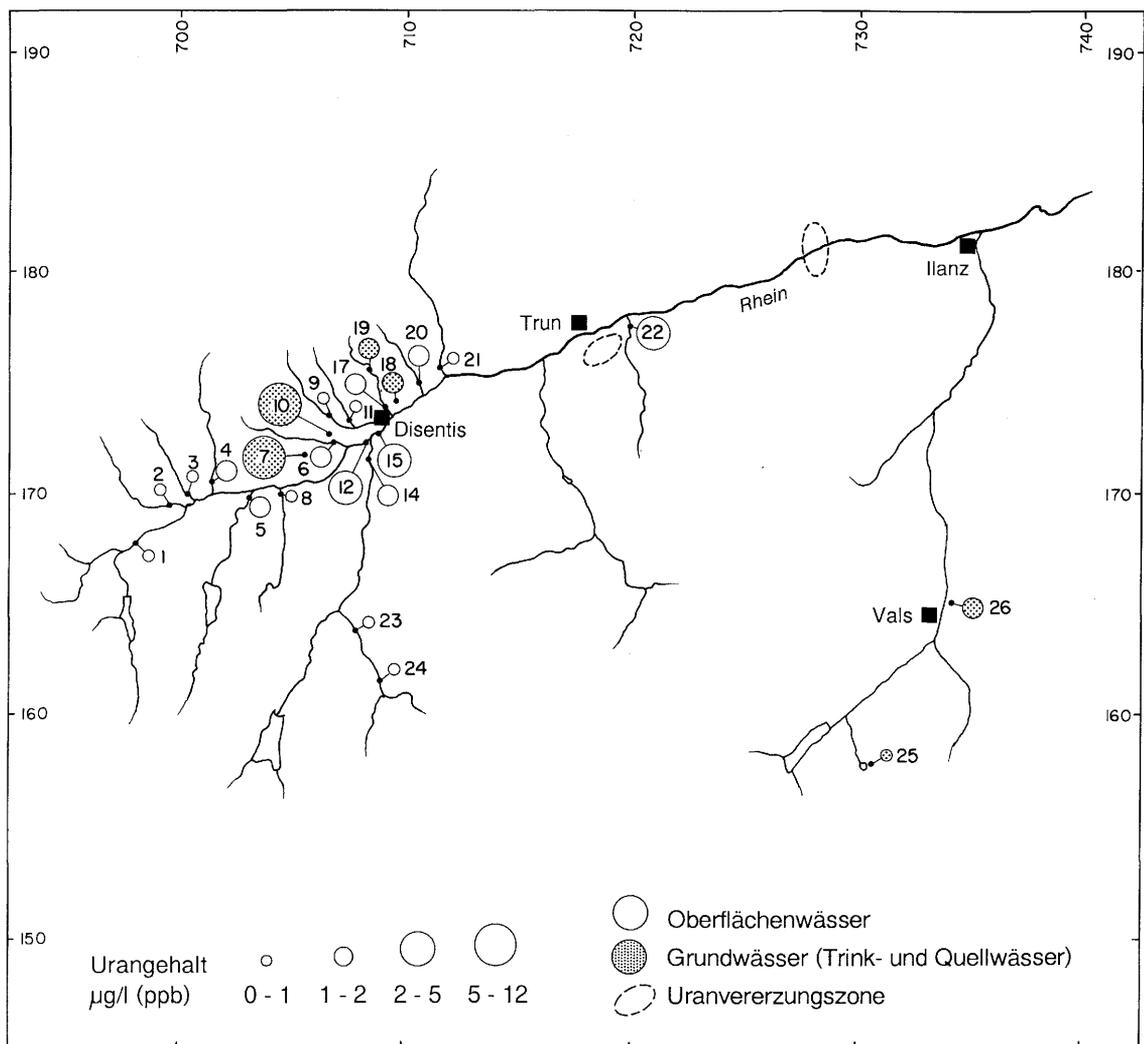
Nr. U-	Typ	Entnahmestelle (Koordinaten)	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
					pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l	
1	O	Le Fou, W.Hang, 2260 m, 585740/107675	25.07.78	1.4	8.2	123	1.50	aus Schutt,<1 l/s
2	O	Le Fou, W.Hang, 2300 m, 586850/107525	05.08.78	12.9	8.1	160	1.44	aus Schutt,<1 l/s
3	O	Le Fou, W.Hang, 2300 m, 586900/107425	05.08.78	6.1	8.2	167	1.50	~1l/s aus U-Mineralis.
4	O	Le Fou, N.Hang, 2240 m, 587200/108500	25.07.78	1.1	7.9	89.7	0.98	Rinnsal <1 l/s
5	O	Le Fou, N.Hang, 2210 m, 587675/108575	04.08.78	13.8	8.3	254	2.04	Rinnsal, alte Cu-Mine
6	O	Le Fou, N.Hang, 2000 m, 587340/108850	03.08.78	2.7	8.2	136	1.44	Bächlein, wenige l/s
7	O	W.Grand Alou, 2100 m, 588250/110175	25.07.78	5.3	7.9	89.7	0.96	aus Schutt, 1-2 l/s
8	O	W.Grand Alou, 2060 m, 587950/109150	03.08.78	13.8	8.4	136	1.46	Rinnsal ~1 l/s
9	O	W. Basso 2100 m, 588375/110500	25.07.78	0.6	7.9	75	0.78	Strasse,Schutt 1 l/s
10	O	Isérables, Bach von Le Fou	13.10.78	9.8	8.1	735	2.60	Zufluss zu 11
11	O	Isérables, "La Fare"	13.10.78	3.1	7.7	334	2.00	vgl.R-108, R-109 Tab.2
12	T	Isérables	13.10.78	5.0	7.8	184	1.54	
13	O	Bach,Str.Nendaz/Siviez 590550/110350	13.10.78	6.9	8.1	150	1.48	Zuflüsse zu "La Printse",
14	O	Bach,Str.Nendaz/Siviez 590500/110475	13.10.78	10.7	8.2	155	1.58	vgl.R-115
15	T	Giétroz, offene Brunnstube	13.10.78	1.9	7.4	84	0.74	
16	T	Giétroz, Brunnen	13.10.78	4.7	7.8	44	0.34	westlichstes Haus
17	O	östl. Giétroz 562700/101800	13.10.78	0.2	7.4	123	0.74	Bächlein
18	O	Str.Giétroz/Finhaut 563750/103425	13.10.78	1.0	7.6	44	0.34	4.Bach b.Finhaut
19	O	Str.Giétroz/Finhaut 563775/103425	13.10.79	1.9	7.6	45	0.36	3.Bach
20	O	Str.Giétroz/Finhaut 563900/103500	13.10.79	3.1	7.5	44	0.38	2.Bach
21	O	Str.Giétroz/Finhaut 563975/103500	13.10.79	4.6	7.4	44	0.38	1.Bach
22	O	Str.Finhaut/Emosson 1785m 562550/103675	27.07.78	0.4	6.9	22.1	0.18	Bach ~4 l/s,unter Schnee
23	Q	Str.Finhaut/Emosson 1360m 563875/103675	26.07.78	3.7	7.2	40.4	0.34	rad.akt.Quelle (R-88b)
24	T	Bahnhof Finhaut 1224 m	26.07.78	3.4	7.3	46.3	0.36	vgl.R-86b

#### 4. WÄSSER AUS ANDERN GEBIETEN DER SCHWEIZ

Die Suche nach weitem U-Anomalien in Grund- und Oberflächenwässern erfolgte nur punktuell und relativ unsystematisch. Die Wasserführung der beprobten Bäche und Flüsse wurde dabei nicht berücksichtigt, doch lässt sie sich meist aus den Angaben der Hydrologischen Jahrbücher rekonstruieren. Die Entnahmestellen folgen sich in den Tabellen im Prinzip flussabwärts.

##### 4.1 Einzugsgebiet Vorderrhein, GR

In Fig. 4 sind die Entnahmeorte und die U-Gehaltsbereiche eingetragen; die Analysergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Die Entnahmen erfolgten im Sommer 1979 (a) und 1981 (b). Gemäss hydrologischer Aufzeichnung (Hydrolog. Jahrbücher 1979 und 1981) war die Wasserführung bei Serie b (1981) etwa doppelt so hoch als bei Serie a) allerdings mit grossen örtlichen Unterschieden und täglichen Schwankungen.



**Fig. 4** Einzugsgebiet Vorderrhein. Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche der Proben von Tabelle 4.

**Tabelle 4:** Wasserproben aus dem Einzugsgebiet des Vorderrheins (Bezeichnung G- ; a 1979, b 1981; O Oberflächenwasser, Q Quellwasser, T Trinkwasser)

Nr.	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen	
					pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l		
1	a	O	Rein da Tuma, unterh. Tschamutt	01.08.79	0.5	7.6	--	--	
2	b	O	Bach aus Val Giuv, 1430 m	24.07.81	0.84	7.55	43.5	0.37	
3	b	O	Bach aus Val Mila, 1430 m	24.07.81	0.29	7.20	21.5	0.10	
4	b	O	Bach aus Val Strem, 1420 m	24.07.81	1.00	7.10	24	0.10	
5	b	O	Rein da Nalps, 1300 m	24.07.81	1.00	8.10	113	1.03	
6	a	O	Bach aus Val Segnas, 1350 m	03.08.79	1.15	7.30	--	--	
7	a	T	Segnas, Brunnen, 1350 m	03.08.79	6.04	7.40	--	--	
8	b	O	Bach aus Val Gierm, 1340 m	24.07.81	0.54	7.85	69	0.67	
9	b	O	Bach, Val Acletta, 1300 m	12.07.81	0.71	7.20	13.5	0.07	
10	b	T	Acletta, Brunnen	24.07.81	6.72	7.25	85	0.76	
11	b	O	Bach aus Val Clavaniev, 1350 m	12.07.81	0.58	7.00	19	0.10	
12	b	O	Vorderrhein vor Disentis, 1050 m	21.07.81	1.76	7.70	84	0.67	vor Mündung v.14
13	a	O	Vorderrhein vor Disentis, 1050 m	02.08.79	5.20	7.60	--	--	vor Mündung v.14
14	b	O	Rein da Medel, vor Mündung	21.07.81	1.40	7.80	179	1.40	
15	b	O	Vorderrhein + Rein da Medel	21.07.81	1.71	7.75	101	0.83	
16	a	O	Vorderrhein + Rein da Medel	02.08.79	2.55	7.40	--	--	
17	b	O	Bach aus Val S. Placi, 1130 m	21.07.81	1.24	7.20	37.5	0.23	
18	b	T	S. Placi-Brunnen, Disentis	21.07.81	1.24	5.85	313	0.33	
19	b	Q	S. Placi Quellfassung Val S. Placi	24.07.81	1.25	5.95	313	0.30	
20	b	O	Bach aus Val Lumpegna, 1080 m	21.07.81	1.01	6.15	20.5	0.10	
21	b	O	Val Russein, Bach, 1250 m	22.07.81	0.38	7.70	60	0.53	
22	b	O	Val Zavrugia, Bach, 900 m	23.07.81	2.23	7.90	90	0.83	
23	a	O	Rein da Cristallina 1620 m	23.07.79	0.5	6.5	--	--	
24	a	O	Val Cristallina, 1800 m	23.07.79	0.5	7.3	--	--	Rinnsal
25	a	Q	b. Guraletsch-See, ob Vals, 2400 m	26.07.79	<0.05	7.3	--	--	Quelle am Boden
26	a	Q	Vals, Thermalquelle, Hotel	26.07.79	1.72	7.3			

**Kommentar:**

Das Einzugsgebiet des Vorderrheins liegt zur Hauptsache im Kristallin des Aare- und Gotthardmassivs und hat so im Prinzip ähnlich günstige Voraussetzungen zur Mobilisierung von Uran wie das obere Rhonetal. Die relativ wenigen Proben von Tabelle 4 zeigen entsprechend auch verschiedene Anomalien, so im Vorderrhein (13) und in den Grundwässern von Segnas (7) und Aclletta (10). Ein Bezug zu den bekannten U-Anreicherungen im Gebiet von Dalisch/Acla Martin/Trun (KRAMERS, 1973) wäre für den erhöhten U-Gehalt der Zavrägia (22) denkbar. Die unterschiedliche Wasserführung von Serie a (1979) und b (1981) wirkt sich bei entsprechenden Doppelanalysen (12/13, 15/16) auf den U-Gehalt im erwarteten Sinn aus.

Zum Verhalten von Uran im Grundwasser liefert die St. Placi Quelle bei Disentis (18, 19) einige Hinweise: Das aus dem Brunnen fliessende Wasser (18) scheidet einen Schlamm aus, der gemäss eigener Analyse zu 75,4 % aus  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und ca. 22 % aus  $\text{SiO}_2(\text{H}_2\text{O})_x$  besteht und 145 ppm U enthält, das wohl durch Koprozitation (oder Sorption) mit dem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bei der Belüftung ausfiel. Bei einem U-Gehalt des Wassers von 1.24 ppb entspricht dies einem Sorptionsgleichgewicht für  $\text{UO}_2^{++}$  zwischen Schlamm und Wasser mit einem Verteilungskoeffizienten von

$$R_D = (145\text{mg/kg}) / (1.24 \cdot 10^{-3} \text{ mg/l}) = 1.2 \times 10^5 \text{ l/kg} \quad (120 \text{ m}^3/\text{kg})$$

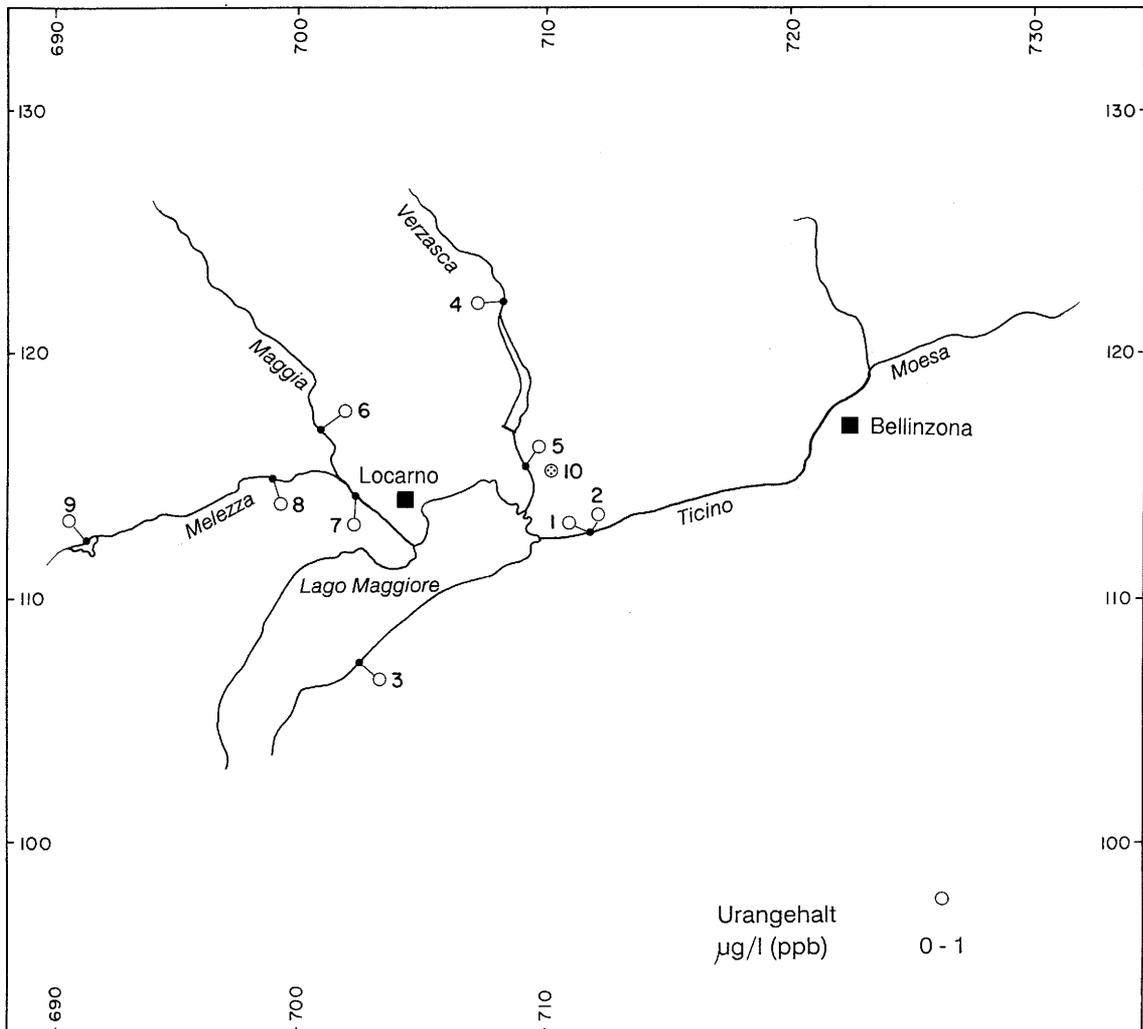
Dieser Wert (für  $\text{pH} \approx 6$ ) liegt im Bereich von etwa  $10^5 - 10^6 \text{ l/kg}$  der sich aus Messungen anderer Autoren ergibt (vgl. LANGMUIR, 1978; UENO & SEKINE, 1990). Das vermutlich aus Klüften der südlichen Randzone des Aarmassivs stammende Quellwasser hat mit 715 Bq/l den höchsten Radongehalt aller untersuchten Wässer der Schweiz (HOEGL, 1980). Aus ihm lässt sich auch die wirksame Retention des Urans grob abschätzen unter der Annahme, dass das Wasser überall gleiche Aktivitäten an U-238 und Rn-222 vom Gestein aufnimmt, das U-238 aber sehr rasch durch Sorption wieder abgibt während das Rn-222 vollständig gelöst bleibt und mit dem Wasser verzögerungsfrei transportiert wird (KRISHNASWAMI et al., 1982). Der mittlere Retardationsfaktor RF über die letzte Strecke des Geosphärentransports, der eine Zeit von der Grössenordnung der Rn-222 Halbwertszeit (3.8 d) beansprucht wird

$$\text{RF} \approx (A_{\text{Rn-222}}) / A_{\text{U-238}} = (715 \text{ Bq/l}) / (0.0155 \text{ Bq/l}) = 4.6 \cdot 10^4$$

Dieser RF-Wert ist bestenfalls als Grössenordnung signifikant, da sowohl die Anreicherungseffekte durch  $\alpha$ -Rückstoss als auch der Zerfall des Rn-222 nicht berücksichtigt werden. In diesem Sinn ist er aber vergleichbar mit dem Bereich von  $10^3 - 10^4$ , den DEARLOVE et al. (1989) für Kluftwässer aus dem Schwarzwaldkristallin (Krunkelbach U-Mine) berechneten.

## 4.2 Einzugsgebiet Ticino / Lago Maggiore

Die Entnahmestellen sind in Figur 5, die Analysenergebnisse in Tabelle 5 zusammengestellt.



**Fig. 5** Einzugsgebiet Ticino/Lago Maggiore. Entnahmestellen und U-Gehaltsbereich der Proben von Tabelle 5.

### Kommentar:

Alle 10 untersuchten Wässer liegen im Normalbereich mit 0.1 - 1 ppb U. Dies ist insofern bemerkenswert als das Einzugsgebiet der untersuchten Wässer zum grössten Teil im Bereich hochmetamorpher Kristallingesteine liegt. Auch die Befunde, dass die terrestrische Strahlung im Maggia-Delta besonders hoch ist (vgl. z.B. SVA, 1987) und dass der Schwemmsand der Melezza Pechblende enthält (C. LEUTHOLD, pers. Mitt. 1981) äussern sich nicht in erhöhten U-Gehalten der betreffenden Gewässer.

**Tabelle 5:**

**Wasserproben aus dem Einzugsgebiet Ticino / Lago Maggiore (Bezeichnung T- ; a 1980, b 1981;**  
 O Oberflächenwasser, T Trinkwasser)

Nr.	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen	
					pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l		
T-									
1	a	O	Ticino, Strassenbrücke Magadino	02.10.80	0.15	7.3	216	1.08	
2	b	O	Ticino, Strassenbrücke Magadino	02.09.81	0.86	7.9	254	1.17	
3	a	O	Lago Maggiore b. Ranzo	02.10.80	0.47	7.6	136	0.72	
4	b	O	Verzasca, Brücke b. Gorippo	02.09.81	0.14	7.6	30	0.12	
5	a	O	Verzasca b. Gordola	01.10.80	0.10	6.8	51	0.28	
6	b	O	Maggia, ca. 2 km ob Ponte Brolla	02.09.81	0.10	7.8	69	0.47	
7	b	O	Maggia, ca. 2 km unterh. Ponte Brolla	02.09.81	0.16	6.8	92	0.60	
8	b	O	Melezza, unterh. Golino	02.09.81	0.16	--	--	-	+ 2ml HNO <sub>3</sub> /l
9	b	O	Melezza, Stausee Palagnedra	02.09.81	0.41	7.5	107	0.50	
10	a	T	Gordola, Trinkwassernetz	02.10.80	0.81	7.4	70	0.56	

### 4.3 Zentralschweiz, Einzugsgebiet von Reuss und Aare (Oberlauf)

Proben und Analysendaten sind in Tabelle 6, die Entnahmestellen in Figur 6 und Figur 7 wiedergeben.

#### **Kommentar:**

Mit Ausnahme der Furkareuss (3), die in der Linie Rhone-/Rheintal mit den vielen Anomalien liegt und dem Trinkwasser von Realp zeigt keines der untersuchten Wässer einen signifikant erhöhten U-Gehalt. Dies, obwohl beide Flüsse und ihr Einzugsgebiet im Oberlauf vollständig im Kristallin des Aare- und Gotthardmassivs liegen. Auch die Sammelbecken Vierwaldstättersee, Briener- und Thunersee haben normale, und im Vergleich zum Genfersee niedrige U-Gehalte. Plausibel sind dagegen die niedrigen Werte für Lütchine und Kander, deren Wasser im wesentlichen durch Kalkformationen fließt.

### 4.4 Nordschweiz, Einzugsgebiet Aare / Rhein

Die wenigen, stichprobeartigen Entnahmen sind in Tabelle 6 unter den Probennummern Z-12 sowie Z 24 bis Z 35 aufgeführt. Die Entnahmeorte sind aus Figur 8 ersichtlich.

#### **Kommentar:**

Die wenigen Proben von Oberflächen- und Trinkwässern in der Nordschweiz zeigen keine Anomalien. Das gilt auch für die Wiese (33), die bei der Durchquerung des z.T. U-reichen Schwarzwaldgranits offensichtlich kaum Uran aufnimmt. Bemerkenswert ist, dass der Rhein in Basel als möglicher Vorfluter für U-reiche Grundwässer aus dem Schwarzwald (vgl. Kap. 6) noch keine Erhöhung des U-Gehaltes zeigt, während dies nach MANGINI et al. (1979) im Gebiet von Heidelberg mit 2.5 ppb der Fall ist. Die Trinkwässer von Birsfelden und Basel sind oberflächennahe Grundwässer, die vor allem durch Sickerwasser aus dem Rhein und der Wiese gespeist werden und mit den tiefen U-reichen Grundwässern aus dem Schwarzwald-Kristallin nicht kommunizieren.

Tabelle 6:

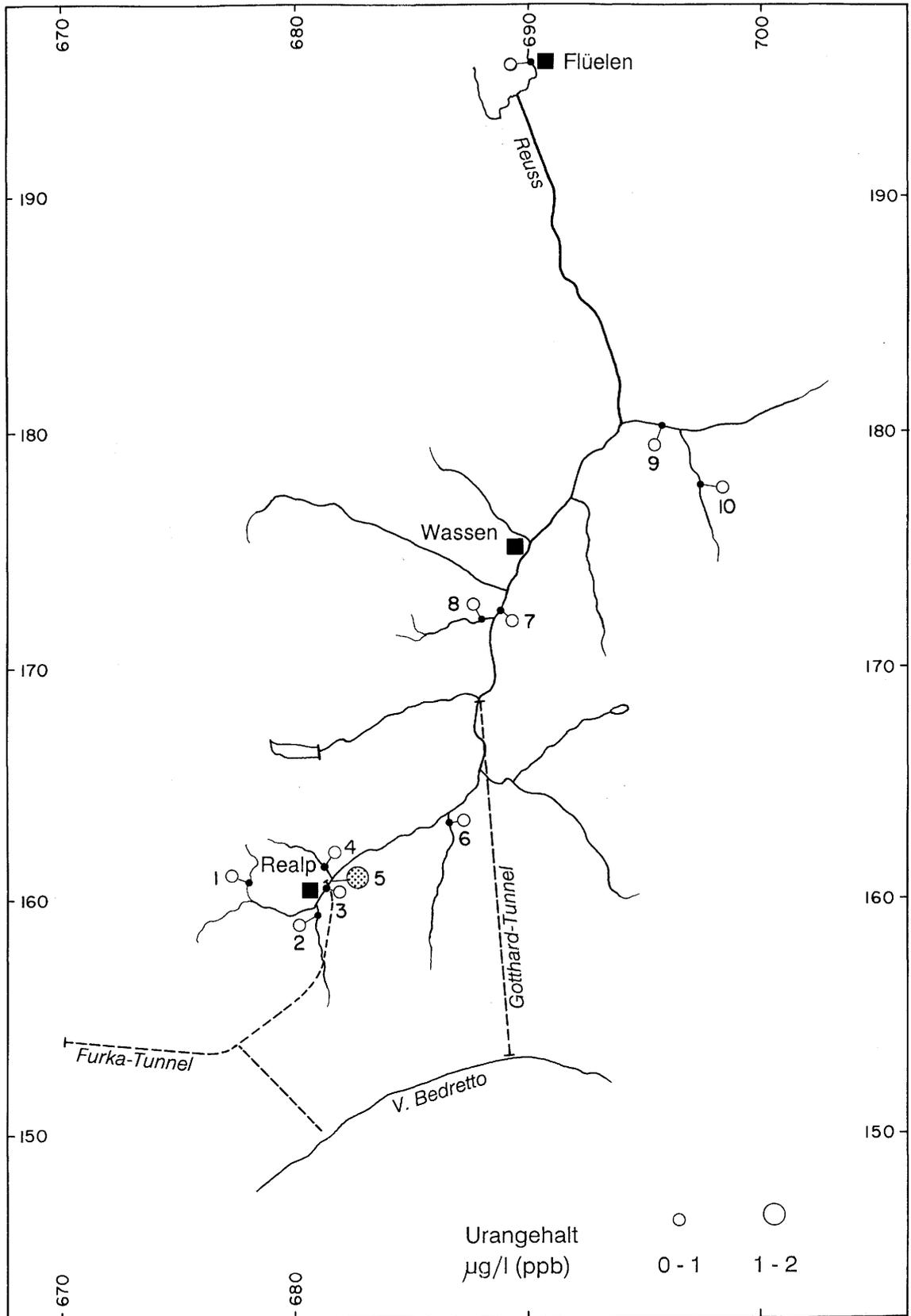
## Wasserproben aus den Einzugsgebieten von Reuss, Aare und Rhein; Zentral- und Nordschweiz (Bezeichnung Z- ;

O Oberflächenwasser, T Trinkwasser)

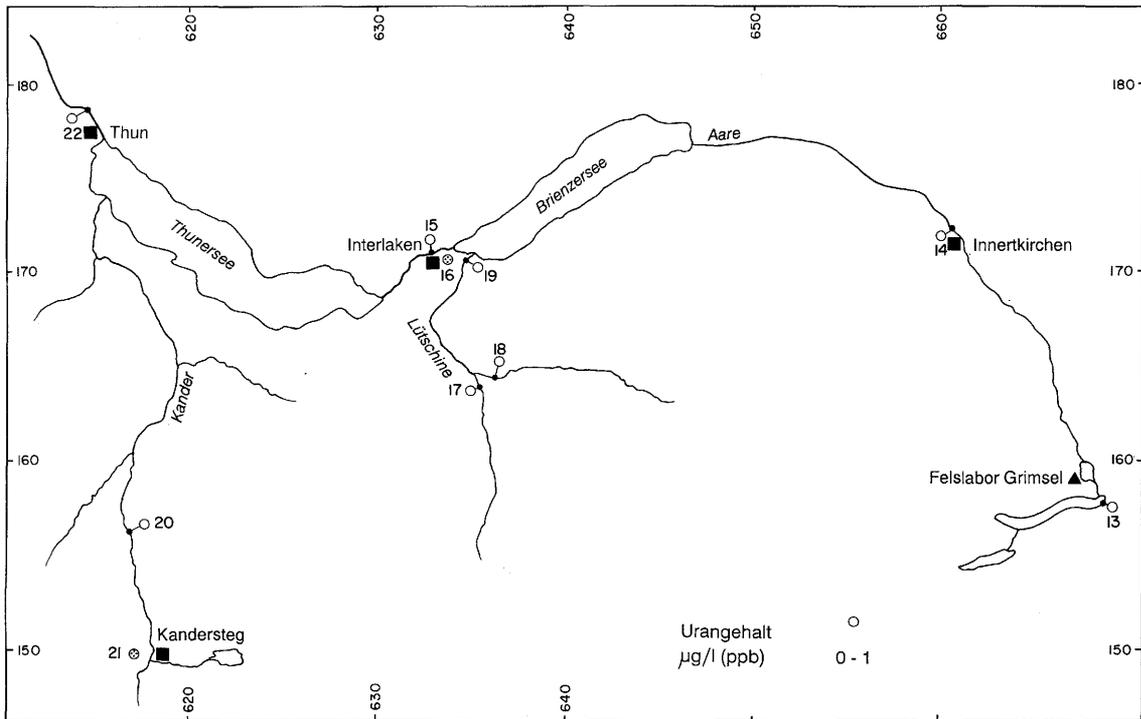
Nr.	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
					pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l	
Z-								
<b>Reuss</b>								
1	O	Tiefenbach ob Furkastrasse, 2150 m	26.08.80	0.50	6.4	6.0	<0.07	
2	O	Witenwasserenreuss Realp	26.08.80	0.25	7.5	36	0.2	
3	O	Furkareuss b. Realp	26.08.80	1.96	7.9	98	0.86	
4	O	Lochbergbach b. Realp	26.08.80	0.44	7.5	60	0.57	
5	T	Realp, Bahnhof	26.08.80	1.80	7.2	56	0.33	
6	O	Göththardreuss b. Hospental	26.08.80	0.85	7.3	113	0.87	
7	O	Reuss b. Wassen, 912 m	26.08.80	0.19	7.3	32.4	0.23	
8	O	Bach aus Rortal ob Wassen	26.08.80	0.54	6.7	9.2	0.10	
9	O	Chärstelenbach Maderanertal b. Bristen 832 m	26.08.80	0.66	8.1	86	0.87	
10	O	Etzlibach b. Porthüslen, 1200 m	26.08.80	0.50	7.3	24.6	0.17	
11	O	Vierwaldstättersee, Flüelen	26.08.80	0.74	7.9	153	1.33	
12	O	Reuss, b. Mündung unterh. Brugg	14.08.79	0.52	8.0	172	1.8	

Tabelle 6: Fortsetzung

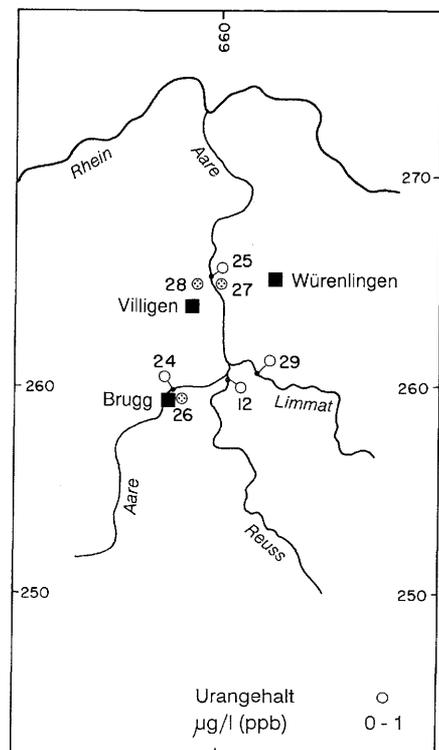
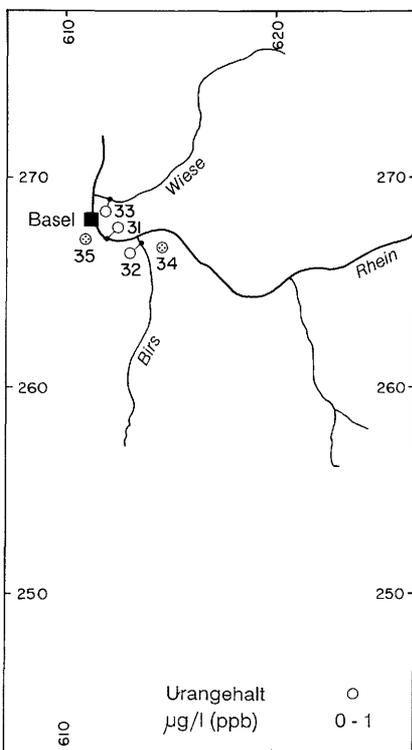
Nr.	Typ	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
					pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l	
<b><u>Aare/Rhein</u></b>								
13	O	Grimsensee	06.08.77	0.40	7.3	61	0.18	
14	O	Aare Innertkirchen	06.08.79	0.60				
15	O	Aare Interlaken	06.04.80	0.56	8.1	147	1.5	
16	T	Interlaken Ost	22.03.80	0.68	6.9	695	8.0	
17	O	Weisse Lütschine, Zweilütschinen	07.04.80	0.53	8.2	246	2.2	
18	O	Schwarze Lütschine	07.04.80	0.34	8.2	305	2.6	
19	O	Lütschine, Bönigen	07.04.80	0.32	8.3	294	2.7	
20	O	Kander, Kandergrund	07.04.80	0.56	8.4	268	2.3	
21	T	Kandersteg	07.04.80	0.23	--	--	--	
22	O	Aare, Thun Nord	07.04.80	0.37	7.0	261	2.1	
23	O	Aare, Bern, Schönaubrücke	08.04.80	0.45	8.1	274	2.5	
24	O	Aare, Brugg	14.08.79	0.62	7.8	261	2.4	
25	O	Aare, PSI Würenlingen	14.08.79	0.54	8.0	267	2.5	
26	T	Brugg	07.08.79	0.75	8.0	--	--	
27	T	Würenlingen - PSI	1978/81	0.72*	7.5	545	5.0	Mittel aus 15 Best.
28	T	Villigen - PSI	16.09.81	0.29	7.4	585	5.2	
29	O	Limmat b. Turgi	14.08.79	0.58	7.8	219	2.0	
30	T	Tüffenwies b. Zürich	27.10.78	<0.1	8.3	267	2.3	
31	O	Rhein, Basel	12.08.79	0.71	7.8	272	2.2	
32	O	Birs, Basel	12.08.79	0.35	7.8	--	--	
33	O	Wiese, Basel	12.08.79	0.23	7.9	--	--	
34	T	Birsfelden b. Basel	12.08.79	0.66	7.5	--	--	
35	T	Basel	12.08.79	0.69	7.9	--	--	



**Fig. 6** Einzugsgebiet der Reuss (Oberlauf). Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche der Proben Z 1 - Z 11 von Tabelle 6.



**Fig.7** Einzugsgebiet der Aare (Oberlauf). Entnahmestellen und U-Gehaltsbereich der Proben Z 13 - Z 22 von Tabelle 6.



**Fig. 8** Einzugsgebiet des Rheins, N-Schweiz. Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche der Proben Z 24 - Z 35 von Tabelle 6.

## 5. GRUNDWÄSSER AUS KRISTALLIN-KOMPLEXEN (ROTONDO- UND AAREGRANIT)

### 5.1 Allgemeines

Der U-Gehalt von Grundwässern im Kristallin kann je nach chemischen und hydrogeologischen Gegebenheiten in weiten Grenzen variieren. Tiefe Formationswässer in stark reduzierendem Umfeld haben meistens U-Gehalte unter 0.1 ppb, oberflächennähere, oxidierende und karbonathaltige Wässer können dagegen Gehalte von 500 ppb und mehr erreichen. So wurden im erbohrten Kristallingrundwasser in Südfinnland extrem hohe U-Gehalte bis zu 20 ppm gemessen (LAHERMO & JUNTUNEN, 1991). In vielen Fällen sind die Redoxverhältnisse im Kristallin örtlich sehr variabel und komplex und lassen kaum Schlüsse auf mögliche U-Gehalte im Grundwasser zu.

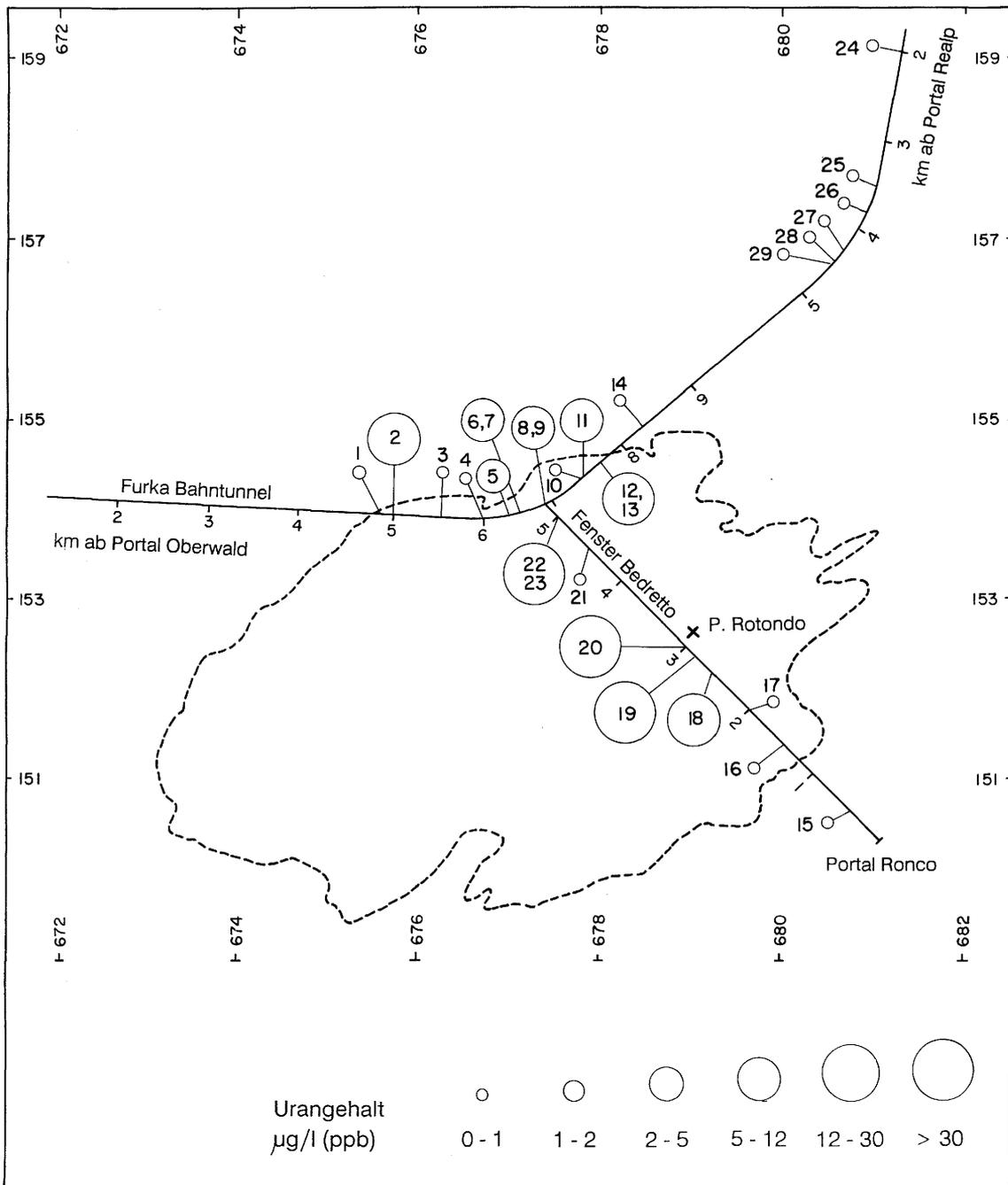
Verhalten und Transport von Uran im Grundwasser von Kristallinkomplexen sind vor allem interessant im Hinblick auf das Langzeit-Migrationsverhalten von Uran und anderen Aktiniden aus einem Lager hochaktiver Abfälle in einer Granitformation. Entsprechende Untersuchungen wurden z.B. von HOFMANN (1989) in der U-Mine Krunkelbach (Menzenschwand, Schwarzwald, BRD) durchgeführt, wo Kluftwässer und sekundäre U (VI) Mineralien ein seit  $10^6$  -  $10^7$  Jahren vorherrschend oxidierendes Milieu signalisieren. Die hier gemessenen U-Konzentrationen im Kluftwasser liegen im Bereich von etwa 1 - 2000 ppb.

Im tiefen, vorwiegend reduzierenden Kristallin, wie z.B. im Innern des Aaremassivs können die durch Tunnel- und Stollenvortrieb erschlossenen Formationswässer lokal z.T. stark erhöhte U-Gehalte entwickeln. Der Grund liegt hier vermutlich in der Mobilisierung von Uran im stollennahen Gestein durch  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  der eindringenden Luft (BAERTSCHL et al., 1991).

### 5.2 Wässer aus dem Furka-Tunnel (Rotondogranit und Gotthardmassiv)

Diese Untersuchung wurde seinerzeit von Dr. T. LABHART (Universität Bern) vorgeschlagen. Wie KISSLING et al. (1978) fanden, zeigt der Rotondo-Granitstock, ähnlich wie andere Granitkomplexe, z.B. der Aaregranit (LABHART & RYBACH, 1976) eine Anreicherung von U und Th, sowie einen Anstieg des U/Th-Verhältnisses in den Randzonen. Dies lässt auf eine hohe Mobilität des U unter hydrothermalen Bedingungen schliessen. Es wäre denkbar, dass sich die zonare Verteilung von relativ mobilem Uran auch in den U-Gehalten rezenter Kluftwässer zu erkennen gibt.

Figur 9 zeigt den Verlauf des 15.4 km langen Furka-Bahntunnels und des 5.2 km langen Fensterstollens zum Bedrettot in Bezug auf den Rotondogranitstock, der auf einer Gesamtstrecke von 6.7 km durchfahren wird. Die geographische Situation ist auch aus Figur 6 ersichtlich. Noch während der Bauphase wurden (durch T. LABHART) die in Tabelle 7 aufgeführten 29 Wasserproben gesammelt und zwar 18 Wässer aus dem Rotondogranit und 11 aus dem angrenzenden Altkristallin (Gotthardmassiv).



**Fig. 9** Grundwasser aus dem Furkatunnel (Rotondogranit und Altkristallin). Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche gemäss Tabelle 7. Eingezeichnet ist ferner die ungefähre Begrenzung des Rotondo-Granitstocks (nach KISSLING et al., 1978)

**Tabelle 7:**

**Wasserproben aus dem Kristallin des Furka-Bahntunnels + Fenster Bedretto (Bezeichnung F-, Entnahme während der Bauphase durch Dr. T. Labhart)**

Nr. F-	Entnahmestelle (Stollen, Metrierung)		Entnahme- datum	Analysendaten				Bemerkungen	
				[U] ppb	pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l		
1	Bahntunnel, 4820 m ab Portal Oberwald		03.09.78	<0.30	9.6	129	0.62	Altkristallin	
2	do.	5000 m	do.	15.03.79	13.1	7.9	127	0.74	Rotondo-Granit
3	do.	5545 m	do.	03.09.78	<0.3	8.7	129	0.34	Rotondo-Granit
4	do.	6015 m	do.	03.09.78	0.6	8.6	108	0.48	Rotondo-Granit
5	do.	6340 m	do.	03.09.78	2.5	8.8	88	0.48	Rotondo-Granit
6	do.	6590 m	do.	03.09.78	6.0	8.8	88	0.48	Rotondo-Granit
7	do.	6590 m	do.	15.03.79	5.5	7.4	92	0.48	Rotondo-Granit
8	do.	6935 m	do.	03.09.78	8.0	9.1	101	0.40	} (Nähe Kreuzung mit F. Bedretto 6890 m)
9	do.	6935 m	do.	15.03.79	10.2	7.6	95	0.38	
10	do.	7450 m	do.	03.09.78	<0.3	8.7	141	0.30	Rotondo-Granit
11	do.	7520 m	do.	03.09.78	11.5	9.2	96	0.40	Rotondo-Granit
12	do.	7725 m	do.	03.09.78	28.0	9.2	87	0.42	Altkristallin
13	do.	7725 m	do.	15.03.79	29.0	8.0	91	0.38	Altkristallin
14	do.	8330 m	do.	03.09.78	0.4	9.5	87	0.44	Altkristallin
15	Fenster Bedretto, 450 m ab Portal Ronco		03.09.78	<0.3	8.3	147	0.88	Altkristallin	
16	do.	1480 m	do.	03.09.78	<0.3	9.0	735	0.16	Rotondo-Granit
17	do.	1990 m	do.	03.09.78	<0.3	9.1	525	0.18	Rotondo-Granit
18	do.	2580 m	do.	03.09.78	16.1	8.7	175	0.42	Rotondo-Granit
19	do.	2835 m	do.	03.09.78	64.5	9.2	67	0.40	Rotondo-Granit
20	do.	2950 m	do.	03.09.78	118	9.0	61	0.42	Rotondo-Granit
21	do.	4495 m	do.	03.09.78	<0.3	9.1	98	0.42	Rotondo-Granit
22	do.	5000 m	do.	03.09.78	60.6	9.2	82	0.44	} ca. 150 m bis Bahntunnel
23	do.	5000 m	do.	15.03.79	37.0	7.5	77	0.43	

**Tabelle 7: Fortsetzung**

Nr. F-	Entnahmestelle (Stollen, Metrierung)		Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
					pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l	
24	Bahntunnel, 2000 m ab Portal Realp		00.11.79	0.23	11.3	565	2.40	Altkristallin, Rigole
25	do.	3500 m do.	00.11.79	0.29	11.1	445	1.70	Altkristallin, Rigole
26	do.	3830 m do.	00.11.79	0.14	7.6	237	0.36	Altkristallin, Quelle l.
27	do.	4350 m do.	00.11.79	<0.05	11.4	616	2.70	Altkristallin, Rigole
28	do.	4520 m do.	00.11.79	0.13	7.7	124	0.52	Altkristallin, Quelle r.
29	do.	4580 m do.	00.11.79	0.17	7.8	276	0.50	Altkristallin

**Kommentar:**

Der U-Gehalt der Furkawässer zeigt bei einem Variationsbereich von < 0.3 bis 118 ppb keine eindeutige Systematik. Eine gewisse Häufung hoher Werte besteht am Nordrand des Rotondogranits im Bereich des Kreuzungspunkts der beiden Stollen. Der Granit hat hier nach KISSLING et al. (1978) lokal variable U-Gehalte zwischen 4 und 12 ppm aber eine Korrelation mit den U-Gehalten entsprechender Wasseraustritte besteht kaum. Im Bedrettostollen ist die Situation sogar paradox: Hier entspringt das Wasser F-20 mit dem höchsten U-Gehalt von 118 ppb einem Granit mit 4 ppm, während die Wässer F-16 und F-17 mit sehr niedrigem U-Gehalt aus den U-reichen Graniten der südlichen Randzone des Rotondostockes (mit ca. 15 ppm U) stammen. Dieser U-reiche Granit zeigte zudem eine wesentlich bessere Auslaugbarkeit mit Leitungswasser als der Granit mit 4 ppm U (vgl. 7.1). Die beiden Befunde lassen darauf schliessen, dass die Aufnahme des Urans durch das Kluftwasser in stollenferneren Bereichen erfolgt. Auslaugversuche an 15 Granitproben aus den beiden Tunnels mit 5 N HCl ergaben nach 3 Tagen Extraktionsausbeuten von 30 - 65 % an relativ mobilem U mit einer schwachen Korrelation zum U-Gehalt ( $r = 0.4$ ) und seiner zonaren Verteilung im Rotondo-Granitstock (LABHART, BAERTSCHI, KEIL unpublizierte Daten, 1981). Auch die Frage ob und inwieweit der Tunnelbau selber zur Mobilisierung des U und zu lokal hohen U-Gehalten führte muss offen bleiben. Eher gegen eine kurzfristige Mobilisierung durch eindiffundierendes  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  aus der Tunnelluft spricht hier eine relativ hohe Schüttung der Kluftwässer (keine stollennahen Porenwässer) und das Fehlen einer deutlichen Zunahme des U-Gehaltes nach 6 Monaten für die Probenpaare F8/9, F12/F13 und F22/23.

Es wäre denkbar, dass durch die Druckentlastung beim Tunnelbau stagnierende Formationswässer mit lokal variablen und z.T. hohen U-Gehalten in Bewegung geraten und als Kluftwässer austreten. Fein verteilte Pechblende in den wasserführenden Mikrokluftungen wäre durchaus in der Lage auch ohne Luftzufuhr hohe U-Pegel in karbonathaltigem Wasser aufrechtzuerhalten, da natürliche Pechblende neben U (IV) stets auch lösliches U (VI) enthält (vgl. 7.2).

Keine U-Anomalien zeigen die Proben F24 - F29 im östlich an den Rotondogranit angrenzenden Altkristallin. Die hohen pH-Werte und Leitfähigkeiten der Sammelwässer in den Abflussrinnen sind hier vermutlich eine Folge der Bautätigkeit.

### 5.3 Wässer aus dem Aaregranit

Der Aaregranit wird im Innern durch zahlreiche Stollenbauten und Tunnels erschlossen. Die Verteilung von Uran und Thorium wurde von LABHART & RYBACH (1976) untersucht und zeigt - ähnlich wie der Rotondogranit - eine zonare Struktur mit niedrigen Gehalten im zentralen Bereich ( $\approx 5$  ppm U) und höheren am Nord- und Südrand (12 - 18 ppm) bei Th/U-Verhältnissen um 2.5.

Die untersuchten Wässer entstammen mehrheitlich dem Nagra Felslabor Grimsel (FLG) und den benachbarten Stollen der Kraftwerke Oberhasli (KWO) im zentralen Teil des Aarmassivs (Granodiorit/zentraler Aaregranit). Die Lage des FLG ist in Figur 7 angegeben. In diesem Stollensystem wurden an vielen Stellen im Bereich von Störungen sekundäre, grün fluoreszierende U-Ausscheidungen an den Stollenwänden beobachtet, die sich innerhalb von Monaten nach dem Stollenausbruch entwickeln und auf Zonen mit hohem Gehalt an mobilem Uran hinweisen. Der zugrundeliegende Kapillarttransport von U-haltigen Porenwässern im FLG wurde von BAERTSCHI et al. (1991) untersucht. Tabelle 8 enthält verschiedene Kluft- und Sickerwässer aus fluoreszierenden und nicht fluoreszierenden Stollenabschnitten. Weitere Proben stammen von anderen Stellen des Aaremassivs sowie aus dem Gotthardmassiv und wurden dem hydrochemischen Untersuchungsprogramm der Nagra entnommen (Nagra 1989).

#### **Kommentar:**

Das breite Spektrum der U-Gehalte, zwischen  $< 0.1$  und 500 ppb zeigt die lokal sehr unterschiedlichen Bedingungen für die Mobilisierung von Uran aus dem Granit. Fluoreszierende Stollenwände signalisieren Zonen hoher U-Mobilität, und Sickerwässer aus solchen Bereichen haben hohe U-Gehalte (A-1 bis A-9). Für die U-Mobilisierung im stollennahen Bereich dürfte die in das ungesättigte Porensystem eindringende Luft (vor allem das  $\text{CO}_2$ ) eine wichtige Rolle spielen.

Sickerwässer aus nicht fluoreszierenden Bereichen sowie die aus Klüften und Bohrlöchern ausfliessenden Wässer haben einen variablen aber meist niedrigen U-Gehalt (A10 - A13).

Die Verhältnisse im FLG und den KWO-Stollen zeigen, dass das heute mobilisierbare Uran - vermutlich in der hydrothermalen Phase - lokal sehr inhomogen umverteilt und in den fluoreszierenden Zonen als feinverteilten Uraninit in den wasserführenden Mikrospalten abgelagert wurde (vgl. BAERTSCHI et al., 1991). Die rezente Remobilisierung bedingt zunächst einen advektiven Porenwassertransport, der auch durch den Stollenbau gefördert oder ausgelöst werden kann, sowie einen geeigneten Wasserchemismus ( $\text{HCO}_3^-$ -Gehalt), zu dem die Stollenbelüftung entscheidend beitragen kann.

Im Hinblick auf ein Lager hochradioaktiver Abfälle im tiefen Kristallin ist diese mögliche, mit dem Stollenbau zusammenhängende Förderung des U-Transportes kaum relevant, da sie nach dem Verschluss des Lagers und seiner Wiederaufsättigung mit Grundwasser wieder abgeschlossen wird.

Tabelle 8: Wasserproben aus dem Kristallin des Aare- und Gotthardmassivs (Bezeichnung A-)

Nr. A-	Entnahmestelle (Stollen, Metrierung)	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen
				pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l	
<u>Aarmassiv</u>							
1	KWO Zentrale Grimsel I, Entlüftungsstollen	17.10.84	449	7.9	305	----	Tümpel a.Boden,fl
2	KWO Zentrale Grimsel I, Entlastungsstollen	17.10.84	10	7.0	34	----	Rinnsal, fl.
3	~ 550 m von Z.Gr.I alter Kabelstollen	17.10.84	107	8.2	111	----	Rinnsal, fl.
4	Transitgasstollen, km 2.48 ab NP Guttannen	12.09.85	73	9.4	177	0.70	N -233, Bohrloch
5	FLG, L342 m W. unter Zerrkluft	22.05.86	73.5	7.9	582	----	Sickerwasser,fl.
6	do.	03.07.89	20.0	7.8	133	----	Sickerwasser,fl.
7	FLG, L342.4 m W. Vakuum-Extraktion	28.02.87	435	8.0	137	0.94	Porenwasser,fl.
8	FLG, L124 m W. Sammelrinne	31.07.86	13.3	7.9	110	0.62	Sickerwasser,fl.
9	FLG, L124 m O. Sammelrinne	31.07.86	7.0	7.5	94	0.50	Sickerwasser,fl.
10	FLG, L87.5 m W. Bohrung	31.07.86	0.83	7.7	86	0.50	Ausfluss ~1cm <sup>3</sup> /Min
11	FLG, L302.7 m W. Lamprophyr unter Folie	03.07.89	0.3	7.8	99	0.45	Sickerwasser
12	FLG, L83 m W. Bohrung BOUS 85002	31.07.86	2.7	7.6	77	0.46	ca.0.5 l/Min
13	FLG, AU96 m, Migrat.Test	02.09.86	0.09	9.5	103	0.70	ca.0.5 l/Min
14	Lötschbergtunnel, km 6.02 ab NP	12.09.85	0.05	8.75	2670	0.3	N-234
<u>Gotthardmassiv</u>							
15	Sondierstollen, KW SBBII, km 0.157 ab P.Amsteg	11.09.85	3.6	7.7	164	2.2	N-231
16	Str.-Tunnel Sicherheits-Stollen, km 2.83 ab NP	11.09.85	32.9	8.04	90	1.4	N-232

KWO Kraftwerke Oberhasli

FLG Nagra Felslabor Grimsel

fl fluoreszierender Bereich

O Ost, W West Seite

N-xyz Proben-Nr. Hydrochem. Programm der Nagra (Nagra 1989)

## **6. URAN-ANOMALIEN IN GRUNDWÄSSERN DER NORDSCHWEIZ UND DES BRD-GRENZGEBIETES (AUSZUG AUS DEM HYDRO-CHEMISCHEN REGIONALPROGRAMM DER NAGRA)**

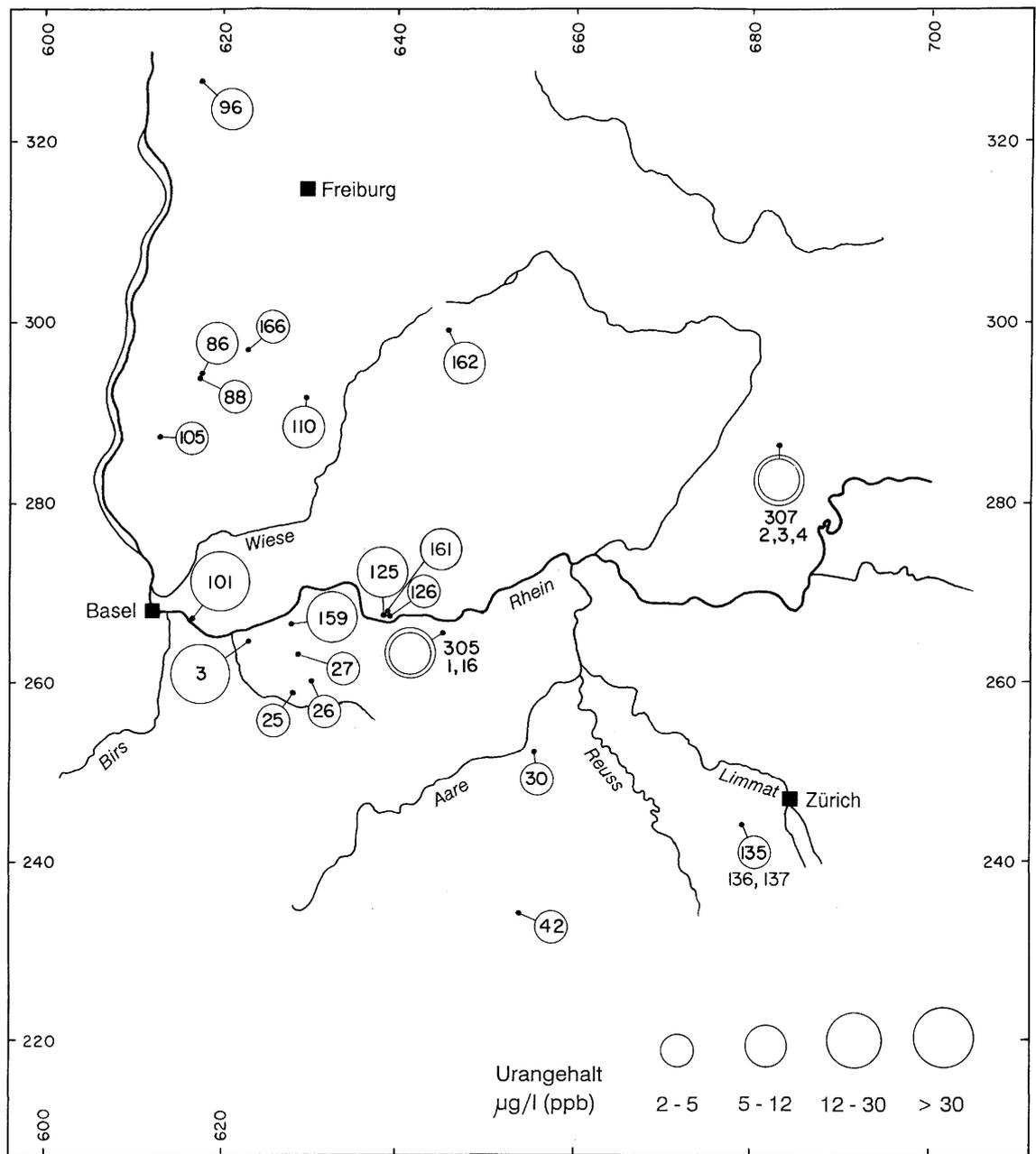
Durch das hydrochemische Regionalprogramm der Nagra (Nagra, 1989) sollen im Hinblick auf ein Endlager für hochaktive Abfälle möglichst zuverlässige Informationen über die Hydrologie im Untergrund der Nordschweiz, vor allem hinsichtlich der Grundwasserflusswege erhalten werden.

Das Programm ist eine wichtige Ergänzung zum Nagra Tiefbohrprogramm und umfasst die möglichst vollständige Charakterisierung der als natürliche oder erbohrte Quellen zugänglichen Grundwässer der Nordschweiz und benachbarter Gebiete, vor allem der BRD. Von 1981 bis 1986 wurden etwa 350 Messstellen erfasst, von denen 111 auch auf Uran beprobt wurden. Mit den zeitlich gestaffelten Mehrfachmessungen wurden insgesamt 223 U-Analysen durchgeführt. Wässer mit U-Gehalten  $\geq 2$  ppb wurden bei 23 Messstellen mit 40 Proben gefunden. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Tabelle 9 wiedergegeben und wurden durch die 5 in den Nagra-Tiefbohrungen gefundenen Anomalien ergänzt. Für die übrigen Wässer mit "normalen" U-Gehalten  $< 2$  ppb sei auf die entsprechenden Nagra-Publikationen verwiesen (Nagra NIB 89-06 Vol 1 & 2, Nagra NTB 86-19, Nagra NTB 91-22).

Die Entnahmestellen der Proben von Tabelle 9 sind aus Figur 10 ersichtlich.

### **Kommentar:**

Am auffälligsten sind die hohen U-Gehalte von Grundwässern längs des Rheintales südlich des Schwarzwaldes, also Kaiseraugst (3), Grenzach (101), Rheinfeldern (159) und Säckingen (125, 126, 161) sowie Kaisten (305/1, 305/16) und Siblingen (307/26, 307/3, 307/46). Uran-Lieferant ist wahrscheinlich der vielerorts stark wasserführende Schwarzwaldgranit, entweder direkt oder über die überlagerten Sedimente, aus denen einige dieser Wässer entspringen. Auch andere Grundwässer aus dem Schwarzwaldkristallin wie N-105, 110, 162, 166 zeigen erhöhte U-Gehalte. HOFMANN (1989) untersuchte das Verhalten von Uran in der stark wasserführenden U-Erzgrube Krunkelbach bei Menzenschwand (vgl. N 162, 163). Schwach mineralisierte und oxidierende Grundwässer konnten hier bis in Tiefen von etwa 300 m verfolgt werden. Bestimmungen an 25 Wasserproben lieferten U-Gehalte zwischen 4 und 80 ppb, in der eigentlichen Erzzone bis zu 3500 ppb. Dagegen zeigen - im Gegensatz zu den Walliser Vorkommen - benachbarte Oberflächenwässer keine U-Indikationen. Das entspricht auch dem Befund im Geochemischen Atlas der Bundesrepublik (FAUTH et al., 1985), dass Oberflächenwässer im Gebiet des Schwarzwaldes praktisch keine U-Anomalien aufweisen. Wahrscheinlich fließen die im Südschwarzwald infiltrierenden Niederschläge relativ rasch durch das Spaltensystem im Granit nach unten und als U-reiche Grundwässer in Richtung Rheintal ohne sich an der Oberfläche bemerkbar zu machen. Auch der Rhein oberhalb von Basel scheint auf Grund seines relativ niedrigen U-Gehaltes von 0.71 ppb von diesen tieferen Grundwässern kaum beeinflusst zu werden.



**Fig. 10** Grundwässer mit [U]  $\geq 2$  ppb aus dem Hydrochemischen Regionalprogramm Nordschweiz und Schwarzwald (BRD) der Nagra. Entnahmestellen und U-Gehaltsbereiche gemäss Tabelle 9.

Tabelle 9:

Grundwasserproben mit [U]<sub>></sub>2 ppb aus dem hydrochemischen Regionalprogramm der Nagra  
(N-Schweiz und Grenzgebiet BRD) und den Nagra Tiefbohrungen (Bezeichnung N- )

Nr. N-	Kanton Land	Entnahmestelle	Entnahme- datum	Analysendaten			Bemerkungen Formation	
				[U] ppb	pH	LF µScm <sup>-1</sup>		Alkal meq/l
3/1	AG	Kaiseraugst, Bohrung WB 5	16.07.81	6.9	6.91	14300	25.6	s-r
3/3	AG	Kaiseraugst, Bohrung WB 5	06.02.84	57.3	6.86	14335	28.2	s-r
25/1	BL	Sissach, Mineralquelle	17.07.81	4.2	7.00	2462	10.6	km
26/1	BL	Wintersingen, Mineralquelle	17.07.81	3.9	7.12	2152	9.7	km
27/1	AG	Magden, Magdalenenquelle	25.11.81	2.3	6.94	2158	12.8	km
30/1	AG	Möriken-Wildegg, Jodquelle	21.07.81	2.9	6.67	741	14.2	jo
42/1	AG	Schwarzenberg-Gontenschwil, Mineralquelle	21.07.82	3.4	7.2	486	11.8	OSM
135	ZH	Stallikon, Müllrain, Quelle	18.11.81	4.3	7.45	631	13.1	OSM
136	ZH	Stallikon, Mülibrunnen 1	18.11.81	3.7	7.45	630	13.2	OSM
137	ZH	Stallikon, Mülibrunnen 2	18.11.81	2.1	7.85	556	11.8	OSM
159/1	AG	Rheinfelden, Bohrung Engerfeld	11.04.83	27.4	6.2	5000	47.3	KRI
159/2		do.	20.04.83	27.5	6.37	4856	49.0	
159/3		do.	09.05.83	27.7	6.28	4685	49.4	
159/3		do.	19.12.83	29.2	6.30	5100	48.0	
86/2	BRD	Badenweiler, Thermalquelle 1	02.03.82	5.3	7.52	374	5.7	mo
88/2		Badenweiler, Produktionsbohrung 3	02.03.82	3.7	7.26	430	5.6	s-r
96/1	BRD	Kaiserstuhl, Oberbergen Badquelle	27.11.81	5.2	7.30	395	8.6	tvu
96/2		do.	11.04.84	5.6	7.6	400	8.8	
101/1	BRD	Grenzach/Wyhlen Min.Wasserbr. 1	25.11.81	51.2	6.72	7063	24.0	mu-so
105/1	BRD	Schliengen, Schlossbrunnen Liel	18.08.81	3.0	6.51	891	15.7	jm HR
110/2	BRD	Bürchau, Subtherme	20.08.81	6.7	8.06	142	2.4	KRI
110/4		do.	20.02.84	6.3	7.68	140	2.2	
125/2	BRD	Bad Säckingen, Badquelle	28.10.81	10.4	6.53	4263	9.6	KRI
125/5		do.	20.08.82	11.9	6.50	4742	9.9	
125/8		do.	16.05.83	11.0	6.54	4960	10.0	
125/11		do.	22.02.84	11.9	6.55	5190	10.1	

Tabelle 9: Fortsetzung

Nr. N-	Kanton Land	Entnahmestelle	Entnahme- datum	[U] ppb	Analysendaten			Bemerkungen Formation	
					pH	LF $\mu\text{Scm}^{-1}$	Alkal meq/l		
125/14		do.	14.11.84	15.1	6.57	5460	10.3		
125/16		do.	12.08.85	14.5	6.52	5600	10.3		
125/17		do.	26.05.86	11.9	6.5	5300	10.2		
126/2	BRD	Bad Säckingen, Margarethenquelle	27.10.81	4.7	6.55	1370	6.2	KRI	
126/5		do.	20.08.82	4.9	6.32	1478	6.4		
126/8		do.	16.05.83	4.7	6.61	1550	6.3		
126/11		do.	22.02.84	4.0	6.63	1360	6.4		
126/14		do.	14.11.84	5.3	6.67	1690	6.4		
126/16		do.	12.08.85	5.2	6.63	1725	6.3		
126/17		do.	26.05.86	4.4	6.60	1600	6.5		
161/1	BRD	Bad Säckingen, Bohrung Stammelhof	22.02.84	9.4	6.68	10690	18.2	KRI	
162/1	BRD	Menzenschwand U-Erz Grube Stelle 1	19.09.85	5.7	6.35	58	0.7	KRI (vgl.Text)	
163/1		Menzenschwand U-Erz Grube Stelle 2	19.09.85	12.9	6.2	73	1.0	KRI	
166/1	BRD	Sulzburg, Bohrung unterh.Waldhotel	18.09.85	3.8	7.3	226	4.3	KRI	
<u>Nagra Tiefbohrungen:</u>									
305/1	AG	Bohrung Kaisten	113.5 m	22.02.84	15.1	7.03	9290	6.1	S
305/16		do.	1271.9 m	27.08.84	6.6	7.93	1660	6.1	KRI
307/2b	SH	Bohrung Siblingen	341.05 m	17.10.88	5.3	8.22	793	4.5	BSST
307/3		do.	478.95 m	09.11.88	24.2	8.00	763	4.3	KRI
307/4b		do.	527.65 m	24.11.88	6.9	8.70	750	4.5	KRI

## 7. BEGLEITENDE LABORUNTERSUCHUNGEN

### 7.1 Auslaugbarkeit von zwei Rotondograniten aus dem Furkatunnel

Es wurde die Frage untersucht, ob der hohe U-Gehalt des Wassers F20 (118 ppb) möglicherweise auf eine besonders hohe Auslaugbarkeit des dortigen Granits (Probe Ro 2945 mit 5.1 ppm U\*) zurückgeführt werden könnte. Als Vergleich diene der Granit Ro 1180 (14.3 ppm U) vom Südrand des Rotondostockes, der im Bereich der U-armen Wässer F16 (F15, F17) mit <0.3 ppb liegt.

Die Qualität der Wässer im Furkatunnel ist nur bezüglich der in Tabelle 7 angegebenen Parameter bekannt. Für die Extraktionsversuche wurden deshalb durch Verdünnung von PSI-Leitungswasser Qualitäten hergestellt, die wenigstens bezüglich LF-Wert und Alkalinität (~ HCO<sub>3</sub>-Gehalt) den Furkatunnelwässern ähnlich sind.

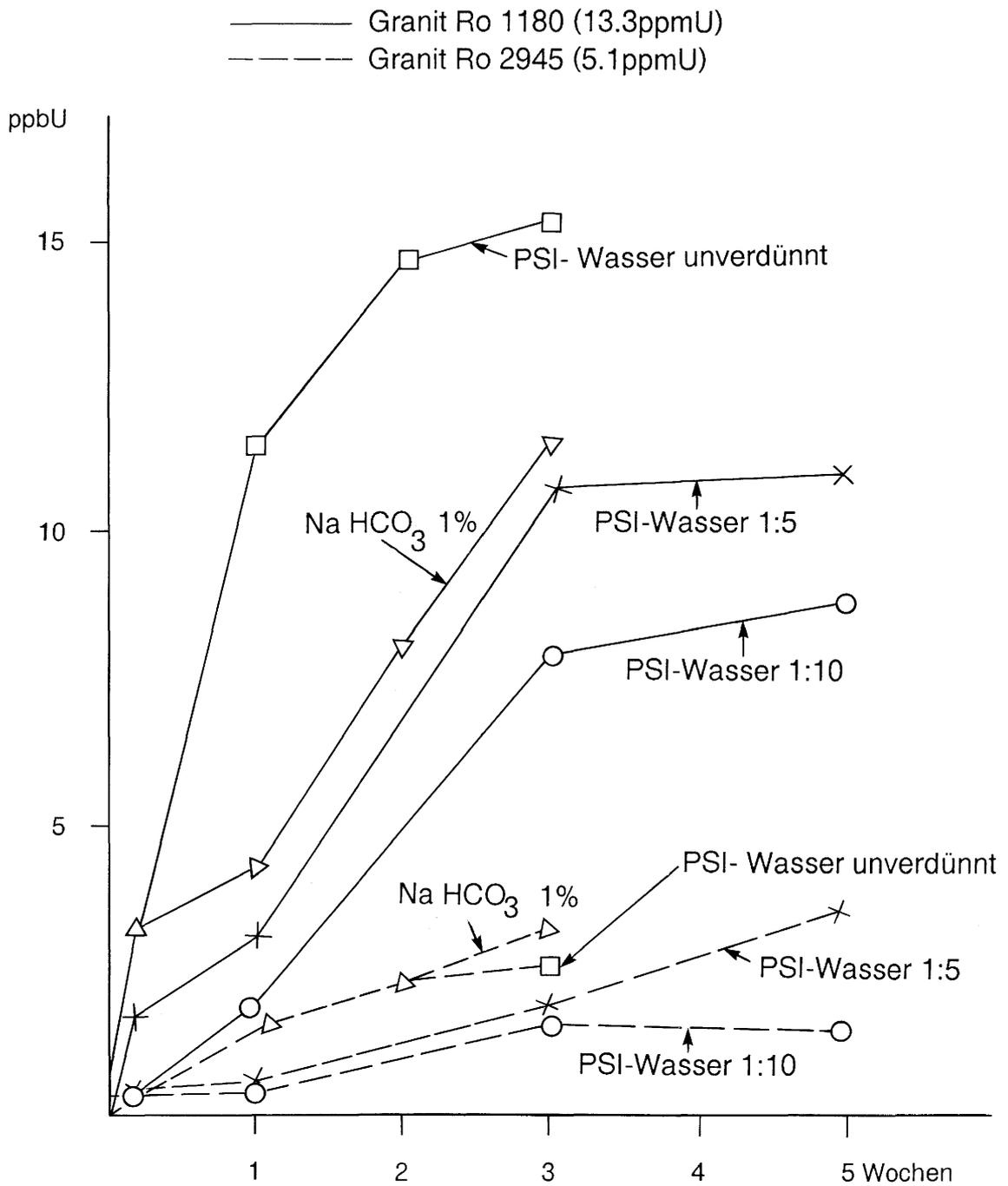
Die Analyse des PSI-Leitungswassers ergab nach KEIL (1986): LF 560  $\mu$  Scm<sup>-1</sup>, pH 7.5, Alkal. 2.7 meq/l, [U] = 0.7 ppb, Ca 105 mg/l, Mg 10, Na 5, K 1.8, Cl 12, SO<sub>4</sub> 32, PO<sub>4</sub> 0.05, NO<sub>3</sub> 24, HCO<sub>3</sub> 150 mg/l.

Je 50 g Granitpulver wurden mit je 500 cm<sup>3</sup> PSI-Leitungswasser, 1:5 und 1:10 verdünntem PSI-Leitungswasser etwa 5 Wochen lang bei 20° leicht geschüttelt und von Zeit zu Zeit Wasserproben für die U-Bestimmung entnommen. Zum Vergleich wurde die Extraktion auch mit einer 1 prozentigen NaHCO<sub>3</sub>-Lösung durchgeführt. Das Ergebnis ist in Figur 11 wiedergegeben.

#### **Kommentar:**

Ro 2945 mit dem 2.6 mal niedrigeren U-Gehalt als Ro 1180 zeigt in allen Wasserqualitäten eine wesentlich niedrigere Auslaugrate, was die eingangs gestellte Frage negativ beantwortet. Die Kurven in Figur 11 entsprechen der Einstellung eines Desorptions/Sorptions-Gleichgewichts mit einem Zeitbedarf von mehreren Wochen. Die resultierenden Gleichgewichts-U-Gehalte im Wasser liegen bezeichnenderweise im Bereich der natürlichen U-Konzentrationen. Der Anteil an extrahiertem Uran erreichte im Maximum 1.2 % (Ro -1180) und liegt für Ro 1180 durchwegs um den Faktor 2-3 mal höher als für Ro 2945, womit sich die Regel zu bestätigen scheint, dass hohe U-Gehalte auch eine erhöhte U-Mobilität signalisieren. Die Extraktionswirksamkeit der Wässer entspricht den Erwartungen mit Ausnahme der 1 % NaHCO<sub>3</sub>-Lösung, die trotz der hohen HCO<sub>3</sub> Konzentration weniger wirksam ist als PSI-Leitungswasser. Die Ergebnisse entsprechen auch denjenigen von SZALAY & SAMSONI (1969), die mit 0.2 prozentiger NaHCO<sub>3</sub>-Lösung und einem Granit/Wasser-Verhältnis von 0.5 (0.1 in unseren Versuchen) durchgeführt wurden. Als wichtigste allgemeine Folgerung ergibt sich, dass Sorptionsgleichgewichte für den U-Gehalt natürlicher Wässer wahrscheinlich viel wichtiger sind als chemische Lösungsgleichgewichte.

\* Der von KISSLING et al. (1978) angegebene U-Gehalt von 3.6 % musste aufgrund eigener Analysen auf 5.1 ppm korrigiert werden.



**Fig. 11** Extraktionsverlauf für U aus zwei Rotondograniten (Pulver) bei 20°C mit verschiedenen Wässern und 1 prozentiger NaHCO<sub>3</sub>-Lösung.

## 7.2 Löslichkeit von natürlichem Uraninit

Die Löslichkeit von Uranoxyd ( $\text{UO}_2$ ) unter verschiedenen Bedingungen wurde oft untersucht und diskutiert (vgl. LANGMUIR 1978, PARKS & POHL 1988). Für den U-Gehalt von Grundwasser auch in mässig reduzierendem Milieu dürfte aber eher die Löslichkeit von natürlichem, feinverteiltem Uraninit  $\text{UO}_{2+x}$  z.B. im Granit von Bedeutung sein, der neben U(IV) stets auch leicht mobilisierbares U(VI) enthält. Es wurden deshalb orientierende Löslichkeitsmessungen von Uraninit in reinem Wasser, das mit reinem  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  oder  $\text{CO}_2$  gesättigt war durchgeführt. Ergänzend wurde auch die Löslichkeit in PSI-Leitungswasser bestimmt. Je 1 g pulverisierter Uraninit (<0.1 mm) von Johann-Georgenstadt (BRD) wurde mit 500 cm<sup>3</sup> Reinstwasser in einer dichten 1l-Sovirelflasche bei Raumtemperatur geschüttelt. Vorgängig waren die 3 Wasserproben während ca. 2h mit reinstem  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  bzw.  $\text{CO}_2$  unter Luftausschluss durchspült worden, wobei alle andern gelösten Gase vollständig ausgetrieben wurden. Die Probe mit PSI-Leitungswasser (vgl. 7.1) war dagegen mit Luft im Gleichgewicht. Ein Lösungsgleichgewicht wurde nach 2 Wochen erreicht und veränderte sich nach weiteren 5 Wochen nicht mehr signifikant.

Folgende U-Gehalte wurden nach dieser Zeit gemessen:

	dest. Wasser, gesättigt mit			PSI- Leitungs- wasser
	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	
U-Gehalte (ppb)	11	6	140000	2000
pH	7.0	7.0	-6.0	7.6

### Kommentar:

Die Löslichkeit in  $\text{CO}_2$ -freiem, reinem und ungepuffertem Wasser liegt mit 11 bzw. 6 ppb ( $4.6$  bzw.  $2.5 \cdot 10^{-8} \text{M}$ ) um etwa einen Faktor 10 höher als für reines  $\text{UO}_2$  zu erwarten wäre (LANGMUIR, 1978), was wohl auf den Gehalt an U(VI) zurückzuführen ist. Dagegen erhöht gelöster  $\text{O}_2$  ohne geeigneten Redoxvermittler wie Fe (II)/Fe (III) die Löslichkeit offensichtlich nicht weiter. Der Wert von 140 ppm in  $\text{CO}_2$ -gesättigtem Wasser entspricht etwa der von SERGEYEVA et al. (1972) bestimmten Sättigungskonzentration für Rutherfordine  $\text{UO}_2\text{CO}_3$  bei pH 6.3. Die Sättigung wurde auch durch die Ausscheidung kleiner Kriställchen aus der deutlich gelben Lösung angezeigt. Gemäss der gelösten Menge Uran, muss der Uraninit mehr als 8 % U(VI) enthalten. Das Experiment zeigt, dass auch unter anoxischen Bedingungen natürlicher Uraninit in einem karbonathaltigen Grundwasser beträchtliche Mengen Uran abgeben kann. Das wird auch durch den im PSI-Leitungswasser erreichten hohen U-Gehalt von 2000 ppb angedeutet, da anzunehmen ist, dass auch hier, wie im Falle des Versuches mit  $\text{O}_2$ -Sättigung, der Luft- $\text{O}_2$  kaum etwas zur Löslichkeit des Urans beitragen konnte.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

- ASIKAINEN, M. und KAHLOS, H. (1979): Anomalously high concentrations of Uranium Radium and Radon in water from drilled wells in the Helsinki region. *Geochim. Cosmochim. Acta* 43, 1681-1686.
- BAERTSCHI, P., ALEXANDER, R. und DOLLINGER, H. (1991): Uranium migration in crystalline rock. Capillary solution transport in the granite of the Grimsel Test Site, Switzerland. Nagra Technischer Bericht NTB 90-15.
- BART, G. und VON GUNTEN, H.R. (1977): Spurenelemente in der Aare. Schweiz. Z. Hydrol. 39, 277-298.
- BERGERIOUX, C., BLANC, J.P. und HAERDI, W. (1977): Preconcentration of environmental trace elements on organic support for neutron activation and high resolution photon spectrometry. *J. of Radioanalytical Chemistry* 37, 823-834.
- BOROLE, D.V., KRISHNASWAMI, S. und SAMAYAJULU, B.L.K. (1982): Uranium isotopes in rivers, estuaries and adjacent coastal sediments of western India: Their weathering, transport and oceanic budget. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, 125-137.
- BOSSHARD, E., ZIMMERLI, B. und SCHLATTER, CH. (1992): Uranium in the Diet: Risk Assessment of its Nephro- and Radiotoxicity. *Chemosphere* 24 (3), 309-321.
- CAMERON, E.M. und HORN BROOK, E.H.W. (1976): Current approaches to geochemical reconnaissance for Uranium in the Canadian shield. Proc. IAEA Sympos. Exploration for Uranium Ore deposits, Vienna, 29.3. - 2.4.1976, IAEA-SM-208/31, 241-266.
- CRAMER, J.J., VILKS, P. and LAROCQUE, J.P.A. AECL (1987): Near field analogue features from the Cigar Lake Uranium Deposit. Proc. Natural Analogues in radioactive Waste Disposal. Symposium Brussels 28.-30.4.1987, B. Côme ed. CEC-Report n° EUR 11037.
- DALL'AGLIO, M. (1971): A study of the circulation of uranium in the supergene environment in the Italian Alpine Range. *Geochim. Cosmochim. Acta* 35, 47-59.
- DEARLOVE, J.P.L., IVANOVICH, M. und GREEN, D.C.: Partition coefficients ( $R_d$ ) for the U Series radionuclides in ion exchange sites and amorphous Fe phase in illite and granite samples. Proc. 6th Conference on water/rock interaction, Marvin, England 3.-8.8.1989, Miles, D.L. (ed) pp 191-195 Balkema Rotterdam.
- DE QUERVAIN, F. (1973): Die Uranvererzungen Valsorey südlich Bourg St. Pierre (Wallis). *Beitr. Geol. Schweiz, Kl. Mitt.* 59.

- DOMINIK, J., CUCCODORO, S., GOURCY, L. und SANTIAGO, S. (1991): A high natural uranium level in the surface and groundwaters of the Alpine Rhone watershed (Switzerland). Internat. Conf. Heavy Metals in the Environment, Edinburgh, Sept. 1991, Vol. 1 342-346, J.G. Farmer, ed. CEP Consultants Ltd. 1991 Edinburgh, EH1 3QH, U.K.
- DOMINIK, J. und MANGINI, A. (1984): High natural content of uranium in the upper Rhone and Lake Geneva (Switzerland). In Sly P.G. (ed.), Sediments and Water interactions, Proc. 3rd internat. Sympos. on Interaction between Sediments and Water, Geneva, Switzerland, 27-31. Aug. 1984, Springer Verlag.
- DUBOIS, J.D. und PARRIAUX, A. (1990): Hydrogeological Characteristics of crystalline aquifers. Example of the Mont Blanc and Aiguilles Rouges Massifs (France, Italy, Switzerland): First results. In Water Resources in mountainous Regions, Memoires IAH, Vol. 22, Part I 504-513, A Parriaux, ed. GEOLEP-EPFL, Lausanne
- EK, J. (1981): Bearbetning av uranhaltsmätningar i vatten och bäcktorv från bäckar i Sverige. KBS Teknisk Rapport 81-11.
- FAUTH, H., HINDEL, R., SIEVERS, U. und ZIMMER, J. (1985): Geochemischer Atlas Bundesrepublik Deutschland, Verteilung von Schwermetallen in Wässern und Bachsedimenten. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- GILLIERON, F. (1986): Zur Geologie der Uranmineralisation in den Schweizer Alpen. Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 77.
- GILLIERON, F. und LABHART, T. (1986): Radioaktivitätsmessungen, radiometrische Anomalien und Uranvorkommen in den Schweizeralpen. Uebersichts-Karte 1:500000. Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 77
- HOEGL, O. (1980): Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Verlag Paul Haupt, Bern & Stuttgart.
- HOFMANN, B. (1989): Genese, Alteration und rezentes Fliess-System der Uran Lagerstätte Krunkelbach (Menzenschwand, Südschwarzwald). Nagra Technischer Bericht NTB 88-30.
- KEIL, R. (1978): Hochselektive differential-polarographische Spurenbestimmung von Uran (katalyt. Nitratreduktion) nach Extraktionsabtrennung. Fres. Z. Anal. Chem. 292 13-19.
- KEIL, R. (1979): Hochselektive spektralphotometrische Spurenbestimmung von Uran VI mit Arsenazo III nach Extraktionsabtrennung. Fres. Z. Anal. Chem. 297 384-387.

- KEIL, R. (1986) (private Mitteilung): Die chemische Zusammensetzung von EIR-Trinkwasser, SR-Grundwasser und Aarewasser beim EIR. Techn. Mitteilung TM-44-86-12 (EIR, heute PSI).
- KISSLING, E., LABHART, T.P. und RYBACH, L. (1978): Radiometrische Untersuchungen am Rotondogranit. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 58, 537-588.
- KRAMERS, J. (1973): Zur Mineralogie, Entstehung und Metamorphose des Uranvorkommens bei Trun. Beitr. Geol. Schweiz geotech. Ser. 52.
- KRISHNASWAMI, S., GRAUSTEIN, W.C., TUREKIAN, K.K. und DOWD, J.F. (1982): Radium, Thorium and radioactive lead isotopes in groundwaters: Application to the in situ determination of adsorption/desorption rate constants and retardation factors. Water Resour. Res. 18 1633-1675.
- LABHART, T.P. (1967): Die Uranvererzung am Südrand des Aaremassivs bei Naters (Kt. Wallis, Schweiz). Beitr. Geol. Schweiz. geotech. Ser. 43.
- LABHART, T.P. und RYBACH, L. (1976): Radioaktivitätsprofile durch den zentralen Aaregranit im Bereich der Schweizer Geotraverse. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 56, 669-673.
- LABHART, T. und RYBACH, L. (1974): Granite und Uranvererzungen in den Schweizer Alpen. Geol. Rdsch. 63, 135-147.
- LAHERMO, P. und JUNTUNEN, R. (1991): Radiogenic elements in Finnish soils and groundwaters. Appl. Geochem. 6, 169-183.
- LANGMUIR, D. (1978): Uranium solution - mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. Geochim. Cosmochim. Acta 42, 547-569.
- LOPATKINA, A.P. (1964): Characteristics of migration of uranium in the natural water of humid regions and their use in the dermination of the background of uranium, Geochem. Int. 4/6 788-795.
- MANGINI, A., SONNTAG, C., BERTSCH, G. und MUELLER, E. (1979): Evidence for a higher natural Uranium content in world rivers. Nature 278, 337-339.
- NAGRA (1989): Hydrochemische Analysen, Regionalprogramm Nordschweiz. Nagra Interner Bericht NIB 89-06, Vol. 1 und 2.
- NAGRA NTB 86-19 (1989), PEARSON, F.J. Jr., LOLCAMA J.L. und SCHOLTIS, A.: Chemistry of waters in the Böttstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten und Leuggern Boreholes. A hydrochemically consistent data set. Nagra Technischer Bericht.

- NAGRA NTB 91-22, BLASER, P. und SCHOLTIS, A.: Sondierbohrung Siblingen. Dokumentation der Wasserprobenentnahmen und Interpretation der hydrochemischen und isotopen-hydrologischen Rohdaten der Sondierbohrung Siblingen. Nagra Technischer Bericht (in Vorbereitung).
- OSMOND J.K. und COWART, J.B. (1976): The theory and uses of natural uranium isotopic variations in hydrology. *Atomic Energy Review* 144, 621-679.
- PARKS, G.A. und POHL, D.C. (1988): Hydrothermal solubility of uraninite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 863-875.
- SANTIAGO, S., CUCCODORO, S. und DOMINIK, J. (1989): Teneurs en uranium dans le Rhone et ses affluents. *Cahiers de la Faculté des Sciences* 19, Université de Genève.
- SCOTT, M.R. (1982): The Chemistry of U- and Th- Series Nuclides in Rivers. In IVANOVICH, M. und HARMON, R.S. (eds.): *Uranium Series disequilibrium. Applications to environmental problems*. Clarendon-Press, Oxford.
- SERGEYEVA, E.I., NIKITIN, A.A., KHODAKOWSKIY, I.L. und NAUMOV, G.B. (1972): Experimental investigation of equilibria in the system  $\text{UO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  in the 25-200°C temperature interval. *Geochem. Int.* 9, 900-910.
- SPALDING, R.F. und SACKETT, W.M. (1972): Uranium in runoff from the Gulf of Mexico distributive province: Anomalous Concentrations. *Science* 175, 629-631.
- SVA, SCHWEIZ. VEREIN FUER ATOMENERGIE (1987): Informationsschrift "Kernenergie". Kap. Radioaktivität und Strahlung, S. 19.
- SZALAY, A. (1964): Cation exchange properties of humic acids and their importance in the geochemical enrichment of  $\text{UO}_2^{2+}$  and other cations. *Geochim. Cosmochim. Acta* 28, 1605-1614.
- SZALAY, S. und SAMSONI, Z. (1969): Investigation of the leaching of uranium from crushed magmatic rock. *Geochem. Int.* 6, 613-623.
- TRIPATHI, V. (1979): Comments on "Uranium solution - mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits." *Geochim. Cosmochim. Acta* 43, 1989-1990.
- UENO, T. und SEKINE, K. (1990): Uranium and thorium adsorption onto pure minerals. in *Alligator Rivers Analogue Project Progress Report 1.6*. - 31.8.1990. Duerden, P., ed. pp 131-133.

