

Hydrogeologie und Hydrochemie des porösen Aquifers von Pfy (Leuk, Siders, Schweiz)

par Marc Schürch¹

Bull. Murithienne 118: 115-128

KURZFASSUNG

Hydrogeologie und Hydrochemie des porösen Aquifers von Pfy (Leuk, Siders, Schweiz)

Im Rhonetal oberhalb der Stadt Siders (Zentralwallis) ist das Gebiet von Pfy durch eine geologische Vielfalt von quartären Sedimenten geprägt: Rhoneschotter, Hangschuttmaterial der südlichen Talflanke, Ablagerungen des Illgraben Schuttfächers und des Bergsturzes von Siders. Der Grundwasserleiter der Rhoneschotter zeichnet sich im allgemeinen durch eine Permeabilität grösser als 10^{-3} m/s aus, was einem sandigen Kies mit einer hohen Fließgeschwindigkeit von ungefähr 20 m/d und einem mittleren Grundwassergradienten von 3.5 ‰ entspricht. Bei Hochwasserständen, zwischen Juni und August, werden die Rhoneschotter stark mit schwach mineralisiertem Flusswasser des Typs Ca, Mg-HCO₃, SO₄ angereichert. Ein Grundwasserzufluss des Typs Ca, Mg-SO₄ fliesst aus evaporitischen Gesteinen der südlichen Talflanke nach Norden in die Rhoneschotter. Bei Niedrigwasserständen dagegen, zwischen November und April, wird der Grundwasserleiter der Rhoneschotter exklusiv mit sulfatreichen Wässern von der südlichen Talflanke angereichert, weil im Winter das Rhonebett praktisch trocken ist. Die Ablagerungen des Bergsturzes von Siders bestehen ausschliesslich aus siltig, sandigen Karbonaten mit helvetischem Ursprung von der nördlichen Talflanke und besitzen eine Permeabilität zwischen $<10^{-5}$ und 10^{-3} m/s. Jeder einzelne Wassertyp repräsentiert gewissermassen eine spezifische Wasserqualität und lokal auftretende, physikalische und chemische Prozesse, die besonders von Gesteinstyp und Aufenthaltszeit abhängen.

RÉSUMÉ

Hydrogéologie et hydrochimie de l'aquifère poreux de Finges (Loèche, Sierre, Suisse)

Dans la vallée du Rhône en amont de la ville de Sierre (Valais central), le site de Finges est caractérisé par de multiples environnements géologiques quaternaires: les alluvions fluviales du Rhône, les alluvions du cône de déjection de l'Illgraben, les dépôts de l'éboulement de Sierre et les éboulis du versant sud. L'aquifère des alluvions fluviales du Rhône est généralement caractérisé par une perméabilité supérieure à 10^{-3} m/s, correspondant à un gravier sableux avec un important écoulement souterrain de l'ordre de 20 m/j et un gradient moyen de 3.5 ‰. En période de hautes eaux, qui ont lieu entre juin et août, le Rhône alimente fortement cet aquifère alluvial par une eau peu minéralisée du type Ca, Mg-HCO₃, SO₄. Un autre apport d'eau du type Ca, Mg-SO₄ provient des roches évaporitiques du versant sud. Par contre, en période de basses eaux entre novembre et avril, l'aquifère alluvial du Rhône est exclusivement rechargé par l'eau sulfatée calcique du versant sud, car le lit du Rhône est pratiquement sec au cours de l'hiver. Les dépôts de l'éboulement de Sierre sont essentiellement composés par des dépôts de calcaires sableux et limoneux d'origine de l'Helvétique du versant nord, qui possèdent une perméabilité entre $<10^{-5}$ et 10^{-3} m/s. Le chimisme de ses eaux souterraines est caractérisé par une distribution spatiale très hétérogène. Chaque type d'eau représente plus ou moins une qualité de fluide et des processus physiques et chimiques très locaux, qui dépendent surtout du type de roche et du temps de transit.

Mots clés: sédiments quaternaires, le Rhône, eau sulfatée, relation eau souterraine-eau de surface, Finges, Valais

¹ Seftastr. 40, 3047 Bremgarten



EINLEITUNG

Das Gebiet von Pfy (Kanton Wallis, Schweiz), 20 km östlich der Stadt Sion gelegen (**Abb. 1**), ist das letzte Gebiet unveränderter Naturlandschaft im Rhonetal oberhalb des Genfersees (BILLE & WERNER 1986). Die Rhoneschotter, die einen wichtigen Grundwasserleiter im oberen Rhonetal bilden, sowie die Bergsturzmasse von Siders und der mächtige Illgraben Schuttfächer prägen das Landschaftsbild von Pfy. Industrielle und landwirtschaftliche Aktivitäten, Kiesgruben, Strassen und eine geplante Autobahntrasse stellen aber andererseits auch anthropogene Einflussfaktoren in dieser Region dar.

Zwischen dem Grundwasserleiter der Rhoneschotter, der Rhone und einem Grundwasserzufluss aus Anhydrit- und Gipsgesteinen der südlichen Talflanke bestehen intensive Wechselwirkungen. Hydraulische, physikalische und chemische Parameter des Grundwassers zeigen grosse räumliche und jahreszeitliche Schwankungen, die jahreszeitliche Abflussschwankungen der Rhone widerspiegeln. Die elektrische Leitfähigkeit schwankt zwischen Werten von 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf der südlichen Talseite und 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entlang der Rhone.

In Pfy bestand das Interesse der Geologen vor allem darin, die Ablagerungen des Bergsturzes von Siders zu studieren (GERLACH 1883, LUGEON 1898, NUSSBAUM 1942 und BURRI 1997). Im Laufe der 80iger und 90iger Jahre des letzten Jahrhunderts wendete sich das Interesse der Geologen besonders dem Studium der hydrogeologischen Verhältnisse entlang der geplanten Autobahntrasse zu. Doch die grossräumigen Fliesswege des Grundwassers und die dreidimensionale Struktur des Grundwasserleiters der Rhoneschotter waren nur schlecht bekannt. Darum wurden während einer vierjährigen Forschungsarbeit des Schweizerischen National Fonds für wissenschaftliche Forschung durch die Universität Neuenburg (SCHÜRCH 2000) intensive hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Gebiet von Pfy durchgeführt, während die Universität Lausanne gleichzeitig geophysikalische Messungen durchführte (MONNET 2001).

Das Ziel dieser Publikation ist, auf der Basis der mit Hilfe der verschiedenen angewandten Methoden gewonnenen Daten eine Synthese der hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse von Pfy zu erstellen.

METHODIK

Im Gebiet von Pfy wurden zwischen Juni 1996 und Mai 1999 unterschiedlichste hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen durchgeführt. Die verschiedenen, angewandten Methoden wie Piezometrie, Abflussmessung, hydrogeologische und geochemische Modellierung, Isotopen, geochemische Multiparameter-Bohrlochmessung und dreidimensionale, räumliche und zeitliche Probeentnahme erlaubten, die hydraulischen und hydrochemischen Parameter des komplexen, porösen

Grundwasserleiters von Pfy zu bestimmen. Sie ermöglichten ebenfalls, die an die verschiedenen Grundwasserkomponenten gebundenen Prozesse zu ermitteln. Während einer Bohrkampagne wurde in den Rhoneschottern bei dem existierenden Piezometer P11 ein Messnetz mit fünf Bohrungen erstellt (**Abb. 1**), um die bisher unbekannt gewesene Mächtigkeit der Rhoneschotter zu ermitteln, sowie Pump- und Tracerversuche durchzuführen (SCHÜRCH *et al.* 2001).

Jede einzelne angewandte Methode bestimmte in einem festdefinierten Milieu einen oder mehrere Parameter des Grundwasserleiters. Die Piezometrie lieferte Informationen über die räumliche und zeitliche Verteilung der Grundwasserstände, der Fliesslinien, der hydraulischen Gradienten und der Anreicherungs- und Ausflussgebiete, während Pump- und Tracerversuche Permeabilität, Transportzeit der Tracer (Uranine, Bakteriophagen), Fliessgeschwindigkeit und effektive Porosität ermitteln liessen. Die Herkunft der Wässer (Niederschlag, Oberflächen- und Grundwasser) wurde mit Hilfe von stabilen Isotopen (Sauerstoff-18, Deuterium) bestimmt (SCHÜRCH & VUATAZ 2000). Die Aufenthaltszeit im Aquifer konnte durch Tritium- und Radonkonzentrationen im Wasser berechnet werden. Die gleichzeitige Anwendung von mehreren Techniken erhöhte signifikant deren Kapazität, die verknüpften hydrochemischen und hydraulischen Prozesse im Aquifer zu verstehen.

Das vorhandene Messnetz umfasst 58 Bohrungen und Piezometer, eine Quelle und die Rhone. Die Arbeit von MAMIN (1996) wurde als Grundlage für die Beschreibung dieses ausgedehnten Messnetzes der Grundwässer und Oberflächenwässer benutzt. Mit Hilfe eines zweidimensionalen, horizontalen Computermodells konnten Fliessrichtung, Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers und Infiltration von Rhonewasser simuliert werden (SCHÜRCH *et al.* 1999).

GEOLOGIE

Quartäre Talfüllung

Die quartäre Sedimentfüllung des Rhonetals von Pfy umfasst sandige Rhoneschotter, Hangschuttmateriale der südlichen Talflanke, Ablagerungen des Illgraben Schuttfächers und des Bergsturzes von Siders. Im Norden begrenzen helvetische Einheiten, im Süden penninische Einheiten die Talfüllung. **Abbildung 1** zeigt eine Karte des Gebietes von Pfy mit den auftretenden, geologischen Einheiten.

Siltige Kalke des Bergsturzes von Siders dominieren die Morphologie von Pfy. Sie formen eine Landschaft aus Seen und Hügeln. Der Bergsturz von Siders fand vor etwa 10000 Jahren, am Ende der letzten Eiszeit (BURRI 1997), statt und häufte im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes mächtige Blöcke von siltigen Kalken auf. Der Bergsturz von Siders hat etwa ein Volumen von 1.1 km^3 besessen (BURRI 1997).

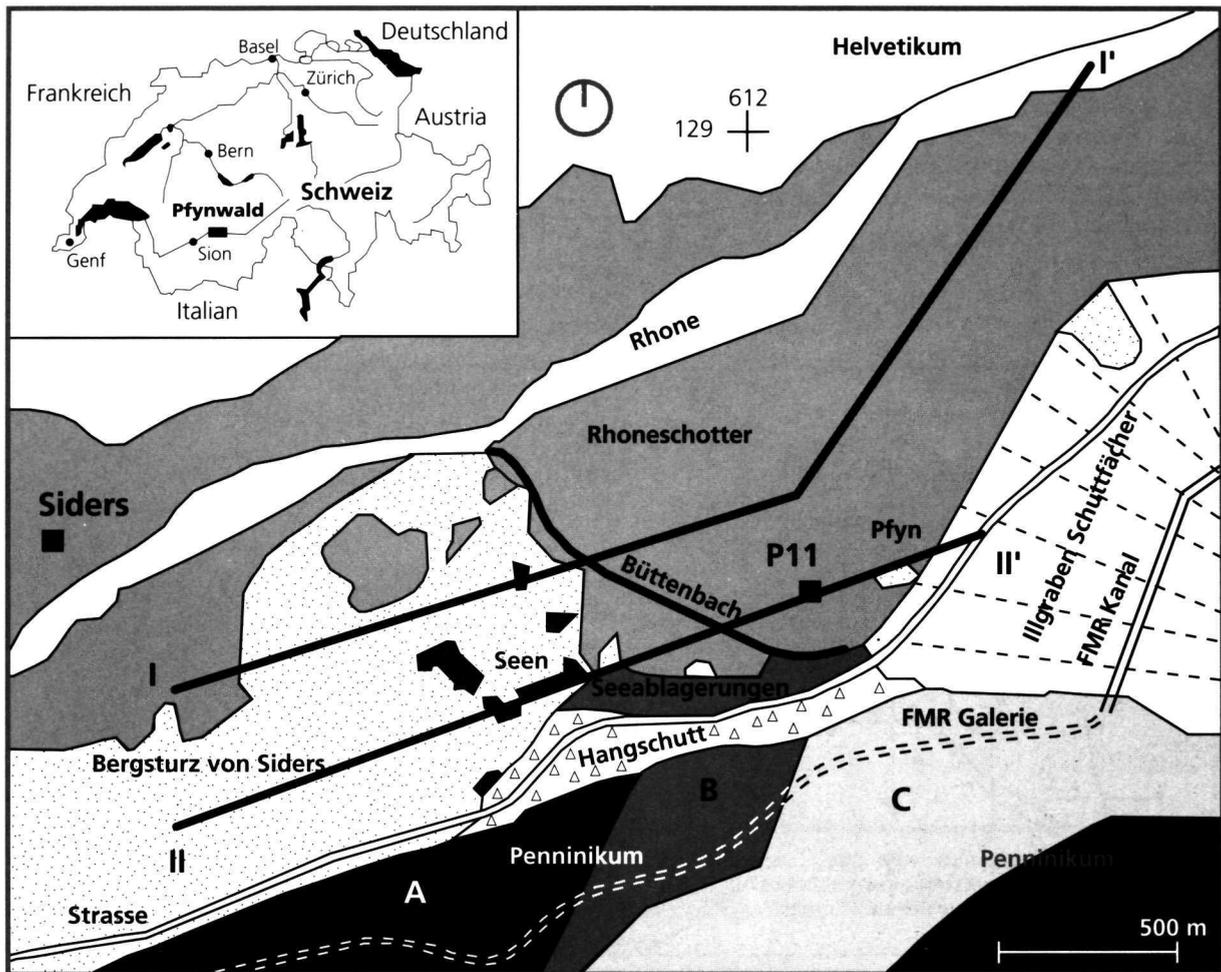


Abb. 1 – Lage des Untersuchungsgebietes und schematische, geologische Karte von Pfy. Penninikum (Pontis-Decke): A) Kalke von Beauregard, B) Mélange, C) Anhydrit-Gipszone. Die schwarzen Linien (I-I' und II-II') geben die Lage der Längsprofile der Abbildung 2 wieder.

Im Osten und im Westen geht die Bergsturzmasse in sandig kiesige Flussablagerungen der Rhone über. **Abbildung 2** zeigt zwei Längsprofile, die sowohl parallel zur Talachse als auch parallel zur Hauptflussrichtung des Grundwassers verlaufen. Die sandigen Rhoneschotter von Pfy, östlich der Bergsturzmasse von Siders gelegen, füllen einen Erosionstrog aus, der in der Tiefe und im Südosten durch siltig sandige Ablagerungen des Illgraben Schuttfächers begrenzt wird. Auf Grund von Korngrösse und geochemischer Zusammensetzung wurde der Illgraben Schuttfächer in zwei Einheiten unterteilt (**Abb. 2**). Der Schuttfächer des Illgrabens liegt mit einer mittleren Steigung von 5% nach Südwesten unter den Rhoneschottern. Bei der Bohrung P33 kommt der Schuttfächer unter Ablagerungen des Bergsturzes von Siders zu liegen. In jener Bohrung befinden sich stratigraphisch gesehen die Ablagerungen des Bergsturzes eingeklemmt zwischen Ablagerungen des Illgraben Schuttfächers unten und der Rhoneschotter oben. Die Mächtigkeit der sandig kiesigen Trogfüllung von Pfy nimmt somit von der südlichen Talseite gegen Norden zu und erreicht ein geschätztes

Maximum von 60 m in der Gegend des aktuellen Rhonebettes.

Das dreidimensionale, konzeptuelle Modell in **Abbildung 3** zeigt die stratigraphische Lage der geologischen Einheiten und die hydrogeologischen Verhältnisse zwischen Rhone und Talrand im Süden. Die Bohrung P11a, die während dieses Forschungsprojektes ausgeführt wurde, hat in der Tiefe unterhalb Ablagerungen des Illgraben-schuttfächers liegende tonhaltige See- und Sumpfablagerungen noch unbekanntes Alters angetroffen. Diese Bohrung zeigt ebenfalls, dass die Bergsturzmasse von Siders nicht über Moränenablagerungen liegt, wie es BURRI (1997) vermutet hat. Dies stellt nun wieder die Mechanismen in Frage, die zur Genese und Morphologie der Bergsturzmasse geführt haben.

Talflanken

Die nördliche Talflanke gliedert sich in die helvetischen Einheiten der Ecaille de Plammis und der Doldenhorn-Decke (BURKHARD 1988). Malmkalke der

Ecaille de Plammis sind auf Kreide der Doldenhorn-Decke überschoben.

Das Penninikum der südlichen Talflanke wird, durch die Houillère-Zone, die Pontis-Decke und zuoberst die Siviez-Mischabel-Decke gebildet (ESCHER 1988). Mächtige, verkarstete Gips- und Anhydritzonen in der Pontis-Decke führen Grundwasser mit Quellschüttungen von mehreren m³/s (JACQUOD 1995).

HYDROGEOLOGIE

Hochwasserstände

Die Rhoneschotter, mit einer Permeabilität grösser als 10⁻³ m/s, stellen den Hauptaquifer von Pfyng dar. Grundwasserspiegel, Fliessrichtung und hydraulischer Gradient stehen in direkter Verbindung mit der im Nordosten infiltrierenden Rhone und folgen somit deren jahreszeitlich geprägten Abflussregime. Im Sommer, bei Hochwasserständen, werden die Rhoneschotter stark mit

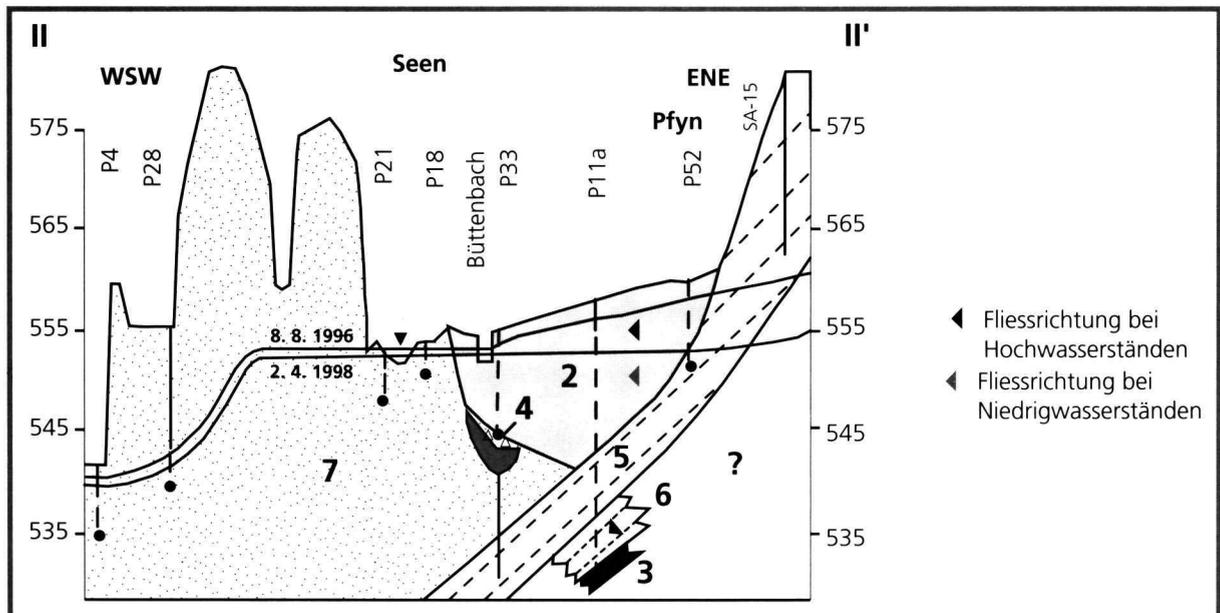
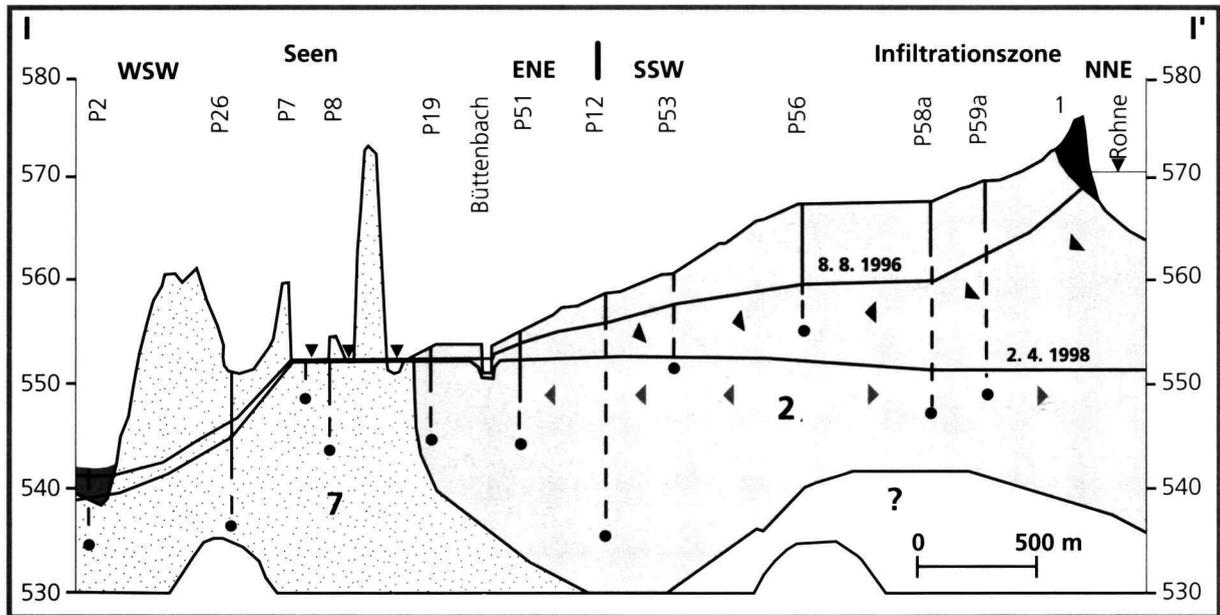


Abb. 2 – Längsprofile mit Lage der Messpunkte, der Filterrohre (gestrichelte Linie), der Grundwasserspiegel und der geologischen Einheiten; 1 = Rhonedamm, 2 = Rhoneschotter, 3 = See- und Sumpfablagerungen, 4 = Hangschutt, 5 = oberer Illgraben Schutfächer, 6 = unterer Illgraben Schutfächer, 7 = Bergsturzmasse von Siders.

Bulletin
118 • 2000
Page 118

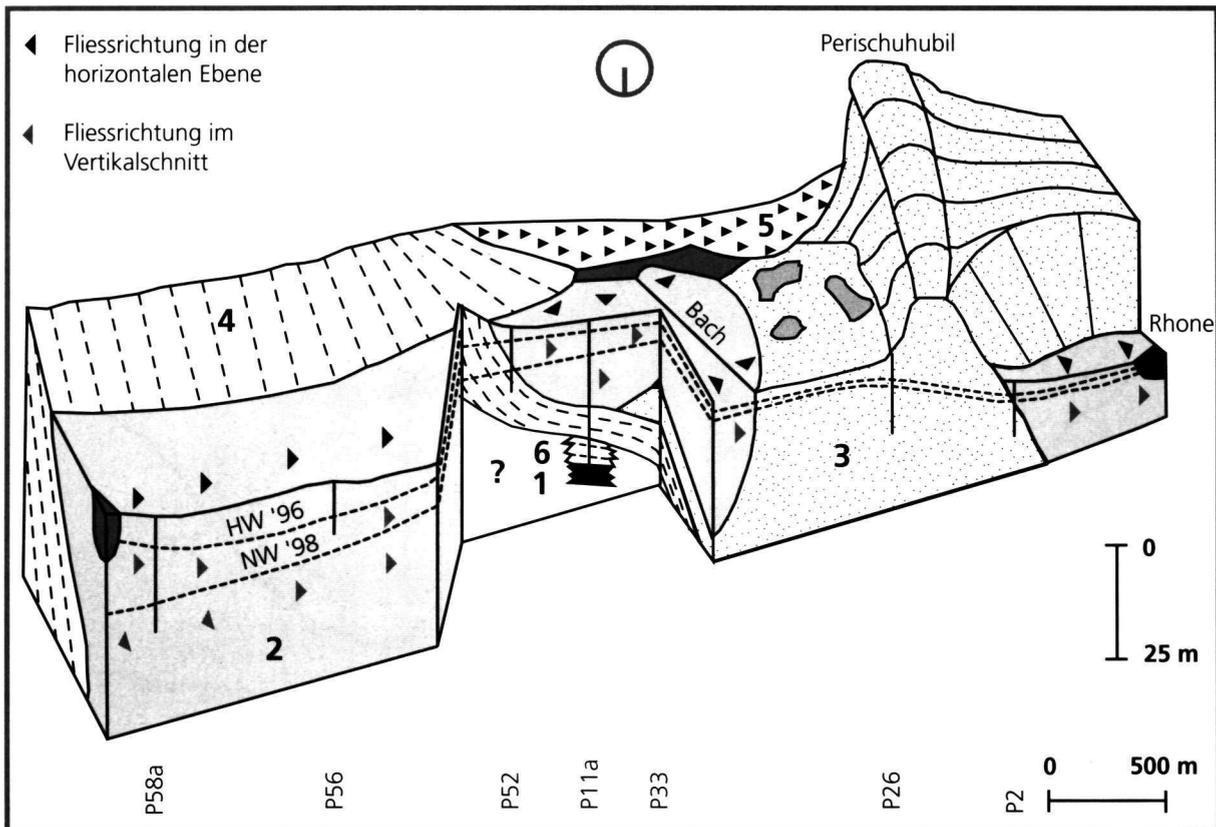


Abb. 3 - Konzeptuelles, dreidimensionales Modell von Pfy mit Lage der Grundwasserspiegel bei Hochwasserständen (HW '96) und Niedrigwasserständen (NW '98) und der geologischen Einheiten; 1 = See- und Sumpfablagerungen, 2 = Rhoneschotter, 3 = Bergsturzmasse von Siders, 4 = oberer Illgraben Schuttfächer, 5 = Hangschutt, 6 = unterer Illgraben Schuttfächer.

NAME	DATUM	TEMP.	EC	pH	EH	O ₂	SPIEGEL	CA	MG	NA	K	SR	SO ₄	HCO ₃	CL	NO ₃	BAL.
		°C	µS/cm		mV	mg/l	m.ü.M.	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	%
SA-8	15.8.96	12.7	2940	7.23	132	1.3	554.77	533.2	151.0	8.6	4.8	7.8	1781	216.6	3.9	2.8	-1.6
Q6	5.8.96	12.8	2470	7.91	485	9.0	—	534.4	68.1	15.9	3.3	6.1	1519	139.5	4.6	1.3	-1.4
SA-12	5.8.96	13.1	2460	7.46	481	8.7	559.39	513.6	78.1	15.7	3.7	6.5	1500	137.3	4.6	3.3	-1.1
P11a	8.8.96	14.8	2090	7.27	410	5.8	555.94	333.2	98.5	26.9	5.2	5.9	1107	197.5	6.8	4.7	-0.9
P52	6.8.96	13.1	1830	7.25	459	6.5	557.19	282.8	86.6	24.9	6.1	4.5	931	256.2	11.9	12.4	-3.4
P28	13.8.96	12.1	1081	7.62	428	5.4	541.71	134.0	65.9	5.3	2.2	2.1	392	253.6	6.5	0.5	-0.6
P12	6.8.96	9.8	774	7.72	447	8.0	556.02	122.8	24.6	3.8	3.8	1.5	266	151.0	5.6	5.8	1.0
P26	12.8.96	10.0	538	8.98	163	2.2	545.37	43.2	39.4	4.3	2.5	1.7	183	78.2	7.1	0.7	2.6
P56	6.8.96	10.5	446	7.98	452	9.6	559.76	67.2	14.1	2.2	2.4	0.7	107	110.5	3.4	9.9	4.2
P59a	7.8.96	10.0	149	8.56	483	6.8	562.71	21.6	3.6	1.4	1.7	0.1	16	56.2	2.6	1.7	4.4
Rhone	7.8.96	7.1	104	8.44	485	11.5	—	15.2	2.2	1.6	1.1	0.1	13	39.7	3.0	1.2	0.9

EC = elektrische Leitfähigkeit bei 25°C; Spiegel = Grundwasserspiegel; Bal. = Ionenbilanz = $[(\sum \text{Kationen} + \sum \text{Anionen}) / (\sum \text{Kationen} - \sum \text{Anionen})] * 100 (\%)$; P = Piezometer; Q = Quelle; SA = Kernbohrung.

Tabelle 1 - Ausgewählte, physikalische und chemische Daten von Grundwasser und der Rhone bei Hochwasserständen im August 1996, klassiert nach abnehmender elektrischer Leitfähigkeit. Die Position dieser repräsentativen Messpunkte ist in Abbildung 5 angegeben.

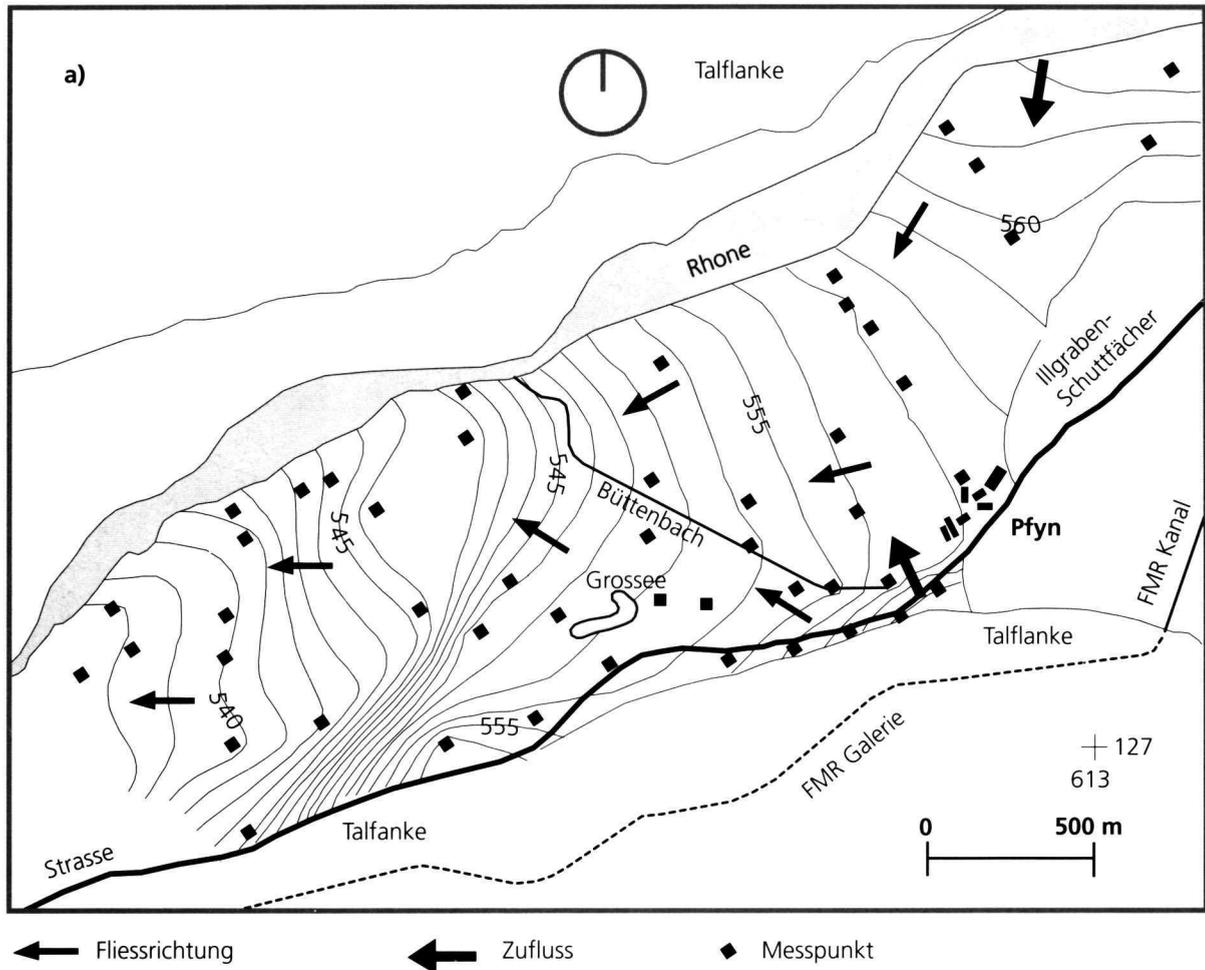


Abb. 4 a) – Karte der beobachteten Grundwasserspiegel und Fließrichtungen (Equidistanz der Gleichen = 1 m); Hochwasserstände August 1996.

Flusswasser angereichert (Abb. 2 und Abb. 3). Das infiltrierende Rhonewasser induziert einen Grundwasserfluss in den Rhoneschottern mit einem mittleren Gradienten von 5.2‰ und einer Fließgeschwindigkeit von 30 m/d parallel zur Talachse. Sulfatreiche Grundwässer aus Gips- und Anhydritvorkommen der Pontis-Decke fließen von der südlichen Talflanke nach Norden in die Rhoneschotter und die darunterliegenden Sedimente. Die Grundwasserfließregime bei Hochwasserständen und bei Niedrigwasserständen sind in **Abbildung 4** dargestellt. Eine Modellierung der Grundwasserverhältnisse ergab unter Hochwasserbedingungen 900-1000 l/s Rhoneinfiltrat und 300-400 l/s Zuflüsse von sulfatreichem Wasser von der südlichen Talflanke (SCHÜRCH *et al.* 1999).

Der Büttlenbach drainiert zunächst im Südosten, die mit sulfatreichen Wässer angereicherte Zone der Rhoneschotter, um dann im weiteren Verlauf vor allem schwach mineralisierte Wässer aufzunehmen. Ein wesentlicher Teil des Zuflusses sulfatreicher Wässer fließt unterhalb des Büttlenbaches weit in die Rhoneschotter hinein (Piezometer P11a, **Abb. 3**). In der Bohrung P11a wurde in einer

Tiefe von 26 m mit Hilfe von hydrochemischen und geophysikalischen Bohrlochmessungen ein Zufluss von sulfatreichem Wasser an der Basis der Ablagerungen des Illgraben Schuttfächers festgestellt (SCHÜRCH *et al.* 2001).

Niedrigwasserstände

Im Winter, bei Niedrigwasserständen, ist das Rhonebett auf einer Distanz von 7 km periodisch trocken gelegt, weil beim Flusswehr in Susten oberhalb von Pfyn bis zu 62 m³/s Rhonewasser durch die FMR Galerie abgeleitet werden (**Abb.1**). Im Gegensatz der sulfatreiche Zufluss von der südlichen Talflanke ist im Jahresverlauf mengenmässig stabil. Der Grundwasserfluss in den Rhoneschottern besitzt einen mittleren Gradienten von 1.7‰ und eine Fließgeschwindigkeit von 10 m/d. Die Amplitude der Grundwasserschwankungen nimmt mit zunehmender Distanz von der Rhone ab: 11 m in Piezometer P59a in der Infiltrationszone der Rhone, 1 m in Piezometer P33 nahe des Büttlenbaches (**Abb. 2**).

Bulletin
118 • 2000
Page 120

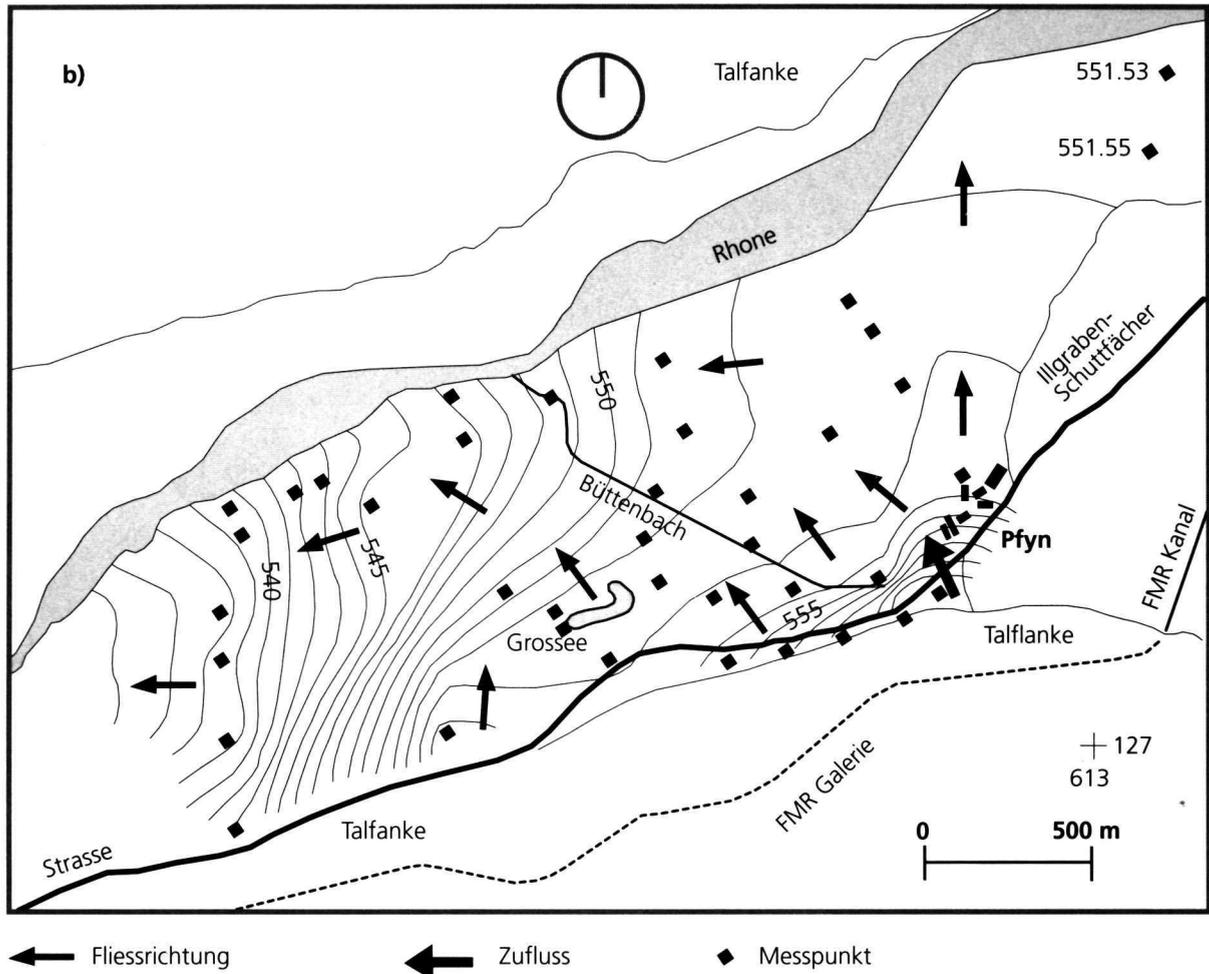


Abb. 4 b) – Karte der beobachteten Grundwasserspiegel und Fließrichtungen (Equidistanz der Gleichen = 1 m); Niedrigwasserstände April 1998.

Bergsturzmasse von Siders

Die heterogenen Ablagerungen des Bergsturzes von Siders mit einer Permeabilität zwischen $< 10^{-5}$ und 10^{-3} m/s bewirken einen hydraulischen Stau effekt auf das Grundwasser. Dieser Stau effekt bewirkt zwischen dem Büttlenbach und den Seen des Bergsturzgebietes einen geringen hydraulischen Gradienten (**Abb. 2 und Abb. 3**). Der Wasserspiegel der Seen ist generell im Gleichgewicht mit dem Grundwasser. Westlich der Seen, innerhalb der Ablagerungen des Bergsturzes, erhöht sich der Gradient deutlich (ungefähr 15‰).

HYDROCHEMIE

Räumliche Verteilung

Abbildung 5 zeigt die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers bei Hochwasserständen im August 1996. Die elektrische Leitfähigkeit,

ein Mass für die Gesamtheit aller im Wasser gelösten Ionen, nimmt in den Rhoneschottern generell von über $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$ südlich von Pfy auf Werte unterhalb von $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ nahe des Rhonebettes ab. Das Rhonewasser besitzt eine Leitfähigkeit von $104 \mu\text{S}/\text{cm}$. Höchstwerte werden in den See- und Sumpfablagerungen südlich des Büttlenbaches sowie im Hangschuttmaterial der südlichen Talflanke beobachtet. Schwach mineralisiertes, sauerstoffreiches Rhonewasser vom Typ Ca, Mg- HCO_3 , SO_4 infiltriert im Nordosten in die Rhoneschotter. Es verdünnt das Grundwasser der Rhoneschotter und prägt somit dessen Wassertyp Ca, Mg- SO_4 , HCO_3 . Anschliessend nimmt entlang des Grundwasserflusses, induziert durch den Rhonezufluss, der pH-Wert von 8.6 beim Piezometer P59a in der Rhoneinfiltrationszone auf Werte von 7.7 beim Piezometer P12 im Zentrum der Rhoneschotter ab (**Abb. 2**). Dieses sauerstoffreiche Grundwasser ist an Kalzit und Dolomit gesättigt.

Der sulfatreiche Zufluss aus den Anhydrit- und Gipssteinen der südlichen Talflanke entspricht dem Wassertyp Ca, Mg- SO_4 . Dieser Wassertyp wird durch

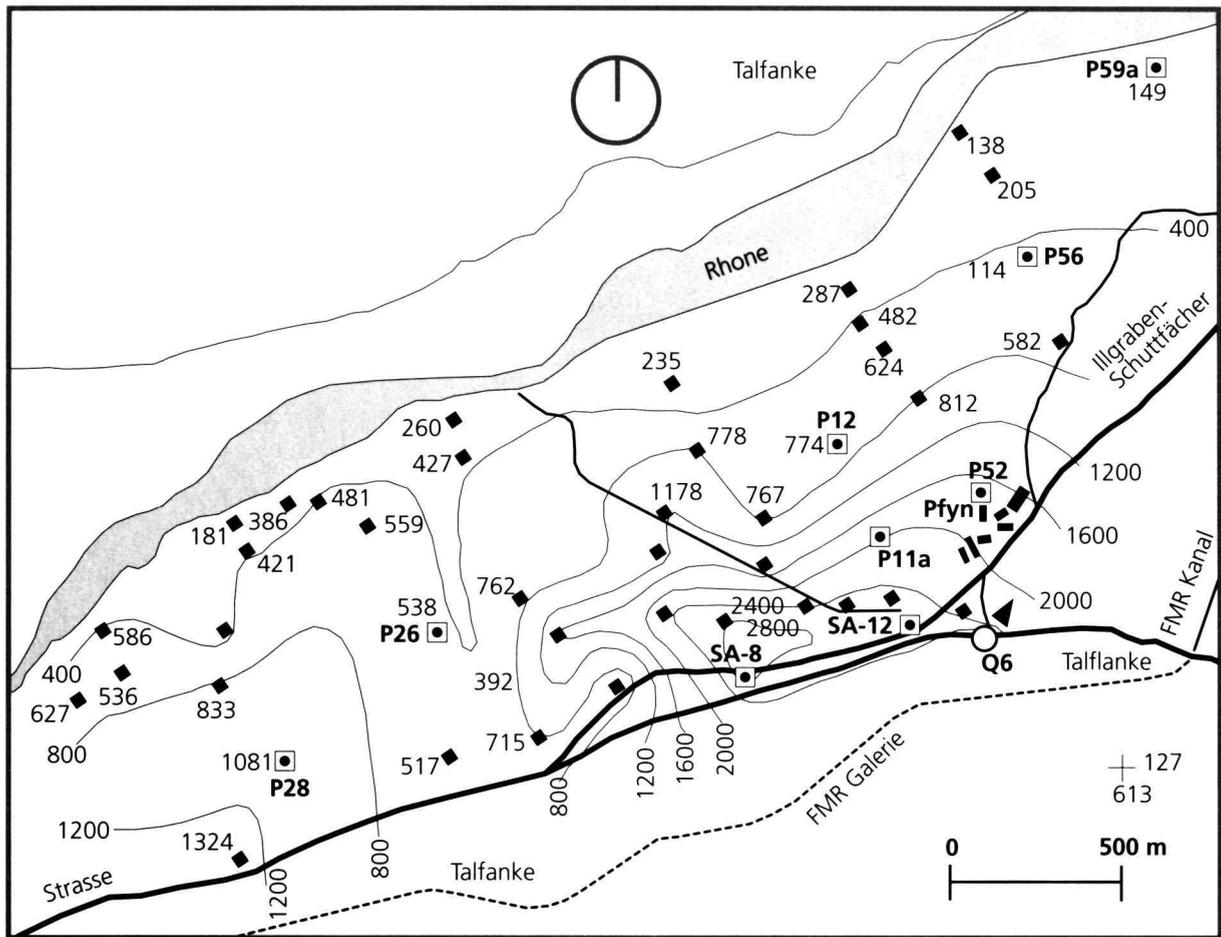


Abb. 5 – Gleichen der elektrischen Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$ bei 25°C) beobachtet bei Hochwasserständen (August 1996). Die Equidistanz der Gleichen beträgt $400\ \mu\text{S}/\text{cm}$. Quadratische Messpunkte repräsentieren die in Tabelle 1 wiedergegebenen chemischen Wasseranalysen.

eine Gipssättigung und eine Übersättigung von Kalzit charakterisiert. Magnesium kommt in diesen Sulfatwässern in einem molaren Anteil zwischen 15 und 19% vor, was darauf hinweist, dass dolomitische Gesteine mit Gips und Anhydritgesteinen assoziiert sind. Mit einer Temperatur von 13.9°C sind die Sulfatwässer subthermal, im Vergleich zum Grundwasser der Rhoneschotter mit 8°C .

Die Grundwasserchemie der Rhoneschotter repräsentiert somit die physikalischen und geochemischen Prozesse zwischen diesen zwei Zuflüssen (Rhoneinfiltrat und sulfatreiches Wasser von der südlichen Talflanke) und den Mineralien des Grundwasserleiters. Die dominanten Prozesse im Aquifer sind Mischung, Lösung und Ausfällung. **Abbildung 6** zeigt ein Piper-Diagramm mit 506 chemischen Wasseranalysen in % meq/l, die zwischen Juni 1996 und Mai 1999 monatlich realisiert wurden. Die dominanten im Wasser gelösten Ionen sind Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Sulfat (SO_4) und Bikarbonat (HCO_3).

Die Grundwässer der heterogenen Ablagerungen des Bergsturzes von Siders, die aus siltig-sandigen Karbonaten mit helvetischem Ursprung zusammenge-

setzt sind, unterscheiden sich vor allem nach Gesamtmineralisation, Bikarbonatkonzentration, pH und Redoxpotential. Jeder einzelne Wassertyp repräsentiert gewissermassen eine spezifische Wasserqualität und lokal auftretende, physikalische und geochemische Prozesse, die besonders von Gesteinstyp und Aufenthaltszeit abhängen.

Tabelle 1 präsentiert chemische Analysen ausgewählter, repräsentativer Messpunkte, die bei Hochwasserständen im August 1996 gemessen wurden.

Zeitliche Verteilung

Abbildung 7 zeigt jahreszeitliche Schwankungen von Grundwasserspiegel, elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur für drei Piezometer (P12, P33, P56), die Rhone und den Bütenbach. Die drei Piezometer liegen auf dem Längsprofil I-I' (**Abb. 2**), das parallel zur Talachse und zur Hauptflussrichtung des Grundwassers verläuft.

Die Temperatur des Rhonewassers variiert zwischen $2.5 - 4.5^\circ\text{C}$ im Winter und $8.5 - 10^\circ\text{C}$ im Sommer. Die tiefe Wassertemperatur im Winter bei einem geringen

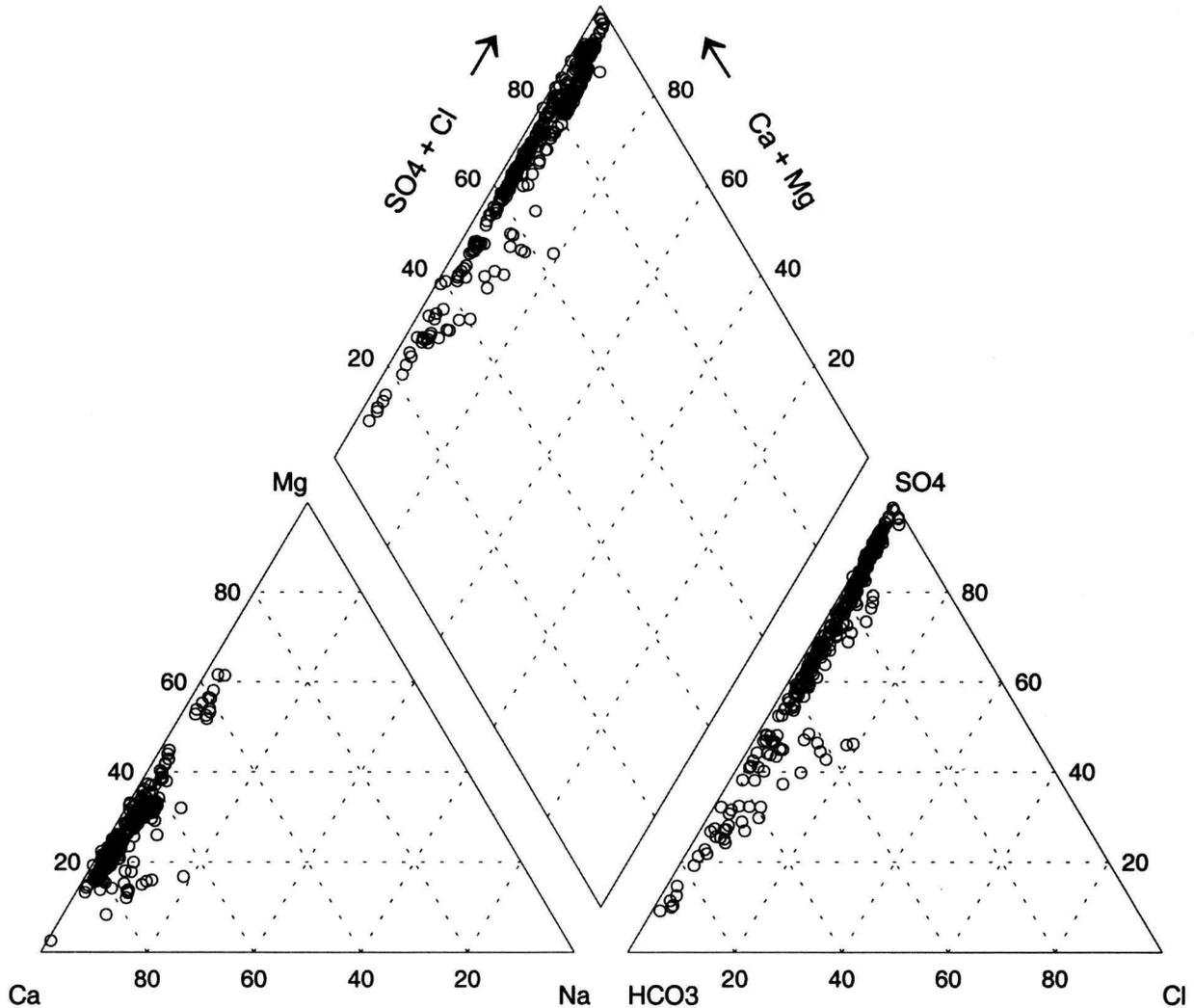


Abb. 6 – Piper-Diagramm der 506 Wasserproben, die zwischen Juni 1996 und Mai 1999 analysiert wurden.

Rhoneabfluss spiegelt niedrige Temperaturen im Einzugsgebiet wider. Die Mineralisation des Rhonewassers besitzt ein Maximum im Januar und ein Minimum im August. Die erhöhte Mineralisation im Winter ist durch hohe Gehalte an Natrium und Chlorid aus Auswaschung von Strassentausalz und gleichzeitig erhöhte Kalzium-, Sulfat- und Nitratkonzentration aus exfiltrierenden Grundwässern bedingt. Die schwache Mineralisation des Rhonewassers im Sommer ist auf Verdünnung infolge Schneeschmelze und Schmelzwasser von Gletschern zurückzuführen.

Die jahreszeitlichen Schwankungen des Grundwasserspiegels und der Wassermineralisation in den drei Piezometern sind klar mit dem Rhoneabfluss korreliert. Die fortschreitende Verdünnung des Grundwassers entlang seines Fließweges repräsentiert die Transportgeschwindigkeit schwach mineralisierten Rhoneinfiltrats im Aquifer der Rhoneschotter. So erreicht die Verdünnung

Piezometer P56 einen Monat früher als Piezometer P12 (Abb. 7).

Die Wassertemperatur in Piezometer P33 nimmt zwischen Oktober und Februar linear ab, um zwischen Februar und Juni von neuem anzusteigen. Diese jahreszeitliche Temperaturentwicklung veranschaulicht die enge Beziehung einerseits zwischen Grundwasser und Lufttemperatur, andererseits zwischen Grundwasser und infiltrierenden Wässern. Die Mineralisation des Büttenbaches ist generell höher als diejenige des Grundwassers im benachbarten Piezometer P33 (Abb. 7c).

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Grundwassermineralisation nimmt generell mit der Entfernung von der Rhone zu und präsentiert somit eine chemische Zonierung parallel zur Rhone. Diese hori-

PARAMETER	RHONESCHOTTER IN DER INFILTRATIONSZONE	RHONESCHOTTER IN DER BOHRUNG P11A DER RHONE	ANHYDRITQUIFER DER SÜDLICHEN TALFLANKE	ANHYDRITQUIFER ABLAGERUNGEN DES ILLGRABEN SCHUTTFÄCHERS	ABLAGERUNGEN DES BERGSTURZES VON SIDERS
Messpunkt	P56	P11a	SA-8	SA-12	P26, P28
Hydrogeologische					
Lithologie	Sandiger Kies	Sandiger Kies	Evaporitische Gesteine	Evaporite / sandiger Silt	Sandig-siltige Karbonate
Gradient (‰)	1.5 - 5.0	1.7 - 5.2	—	36 - 64	0.7 - 15
Permeabilität (m/s)	$> 10^{-3}$	$> 10^{-3}$	—	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-5} - 10^{-3}$
Fliessgeschwindigkeit (m/d)	10 - 30	122 - 278	—	1.4 - 2.8	0.6 - 1.3
Effektive Porosität (%)	—	5 - 13	—	—	—
Hydrochemische					
Wassertyp	Ca, Mg-SO ₄ , HCO ₃	Ca, Mg-SO ₄ , HCO ₃	Ca, Mg-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-HCO ₃ oder Mg, Ca-SO ₄
TDI (mg/l)	290 - 630	1791 - 1926	2672 - 2702	2052 - 2363	239 - 860
Isotopische					
Mittlere Infiltrations- höhe (m.ü.M.)	—	1480	1060	1305	600
Transitzeit	1 Monat	2 Monate	einige Jahre	>40 Jahre	—
Reaktionszeit bei intensiven Regenfällen	1 Monat	1 Monat	2 Monate	2 Monate	—

TDI (mg/l) = minimaler und maximaler Wert der Summe der gelösten Ionen (TDI) beobachtet zwischen Juni 1996 und Mai 1999; mittlere Infiltrationshöhe = mittlere Höhe der Infiltrationszone berechnet mit der Gleichung $d^{18}O = -0.001 \cdot \text{alt.} - 12.89$ (SCHÜRCH 2000).

Tabelle 2 – Hydrogeologische und hydrochemische Parameter des komplexen, porösen Aquifers von Pfyn.

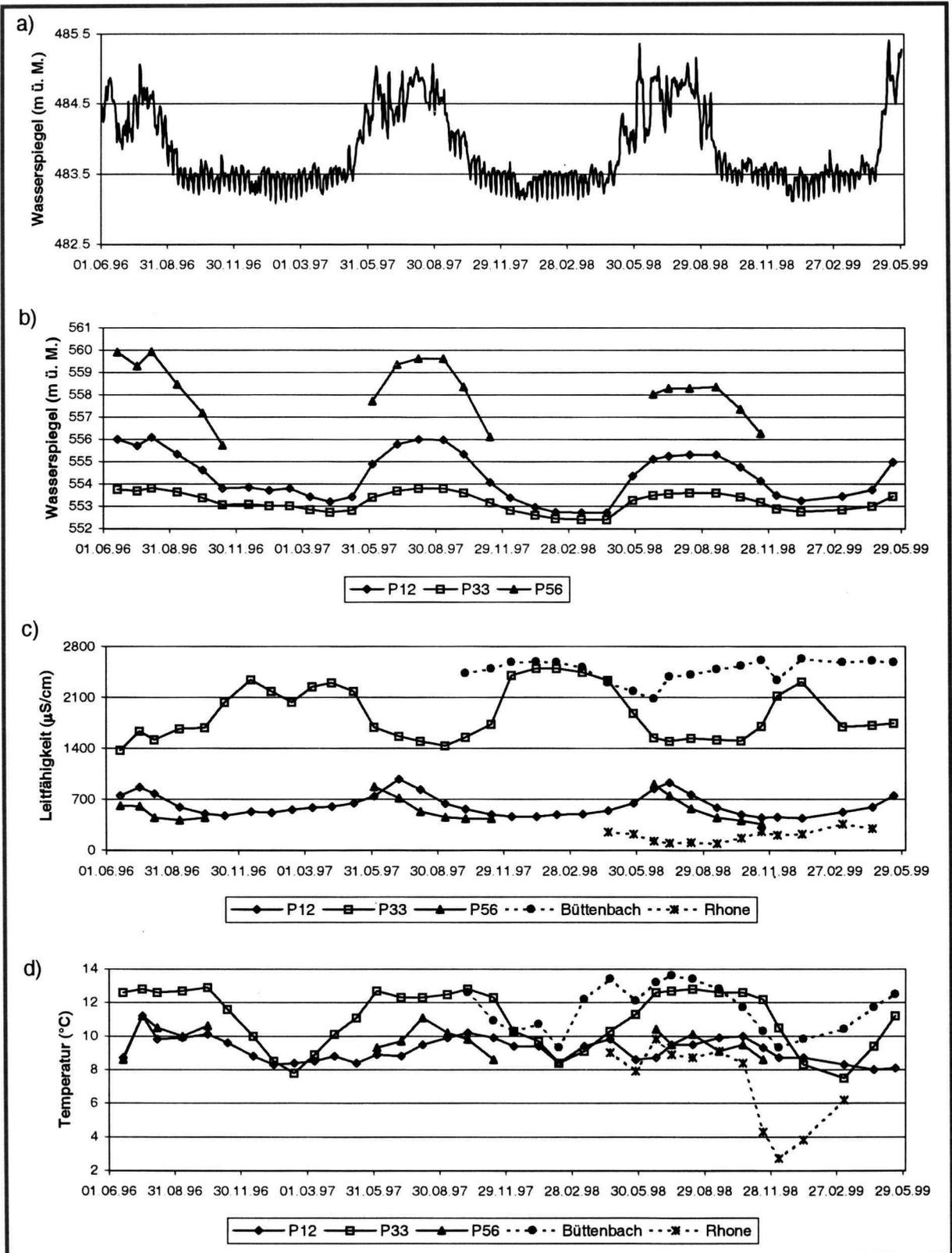


Abb. 7 - Jahreszeitliche Schwankungen. a) Wasserspiegel der Rhone in Sion bei der Messstation der Landeshydrologie und -geologie; b) Grundwasserspiegel von drei Piezometer; c) elektrische Leitfähigkeit; d) Temperatur.

zontale Verteilung ist typisch für die Gesamthärte und die Kalzium-, Magnesium-, Sulfat- und Bikarbonatkonzentrationen, weniger offensichtlich für die anderen gelösten Bestandteile. **Tabelle 2** fasst die in dieser Studie bestimmten hydrogeologischen und hydrochemischen Parameter zusammen. Sie sind nach den unterschiedlichen, chemischen Zonen gegliedert.

Die Auswertung der hydrochemischen Daten erlaubte, die hydrodynamischen Beziehungen des Grundwasserleiters mit der Rhone, der südlichen Talflanke und des Büttenbaches zu beschreiben. Bei Hochwasserständen, zwischen Juni und August, werden die Rhoneschotter stark mit schwach mineralisiertem Flusswasser des Typs Ca, Mg-HCO₃, SO₄ angereichert. Ein Grundwasserzufluss des Typs Ca, Mg-SO₄ fliesst aus evaporitischen Gesteinen der südlichen Talflanke nach Norden in die Rhoneschotter. Bei Niedrigwasserständen dagegen, zwischen November und April, wird der Grundwasserleiter der Rhoneschotter exklusiv mit sulfatreichen Wässern von der südlichen Talflanke angereichert, weil im Winter das Rhonebett praktisch trocken ist.

Die Herkunft der Wässer (Niederschlags-, Oberflächen- und Grundwasser) wurde mit Hilfe von stabilen Isotopen (Sauerstoff-18, Deuterium) bestimmt. Die Resultate der Isotopenuntersuchungen sind im Detail in SCHÜRCH & VUATAZ 2000 beschrieben. Die Aufenthaltszeit im Aquifer konnte durch Tritium- und Radonkonzentrationen im Wasser berechnet werden (SCHÜRCH 2000). Dabei hat es sich gezeigt, dass die Mineralisation der sulfatreichen Wässer der südlichen Talflanke direkt mit Niederschlägen korrelierbar ist. Bei starken Regenfällen nimmt die Mineralisation der Wässer unterschiedlich stark ab. Gleichzeitig erhöhen sich markant die Quellschüttungen (z.B. Quelle Q6, SCHÜRCH 2000). Die Reaktionszeit der Quellen liegt zwischen einem und zwei Monaten. Die mittlere Höhe der Infiltrationszone liegt auf der südlichen Talflanke zwischen 1000 und 1400 m.ü.M.

Was die Trinkwassernormen der in dieser Studie analysierten inorganischen Parameter betrifft, ist die Grundwasserqualität des porösen, komplexen Aquifers der Rhoneschotter von Pfy gut. Die hohe Permeabilität und die massive Anreicherungsmenge des Aquifers favorisieren die Nutzung der Rhoneschotter von Pfy als Trinkwasserreserven.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde durch den Schweizerischen Nationalfonds für wissenschaftliche Forschung finanziert (Forschungsprojekte N° 21-43477.95 und 20-52289.97). Der Autor bedankt sich bei Marcel Burri, Bex, und bei Ronald Kozel, Landeshydrologie und -geologie, deren Kommentare wesentlich zum Gelingen dieses Artikels beigetragen haben.

LITERATUR

- BILLE, R.P. & P. WERNER. 1986. *Trésors naturels du Bois de Finges*.- Société suisse de travail manuel et de réforme scolaire, Liestal, Schweiz.
- BURKHARD, M. 1988. L'Helvétique de la bordure occidentale du Massif de l'Aar (évolution tectonique et métamorphique).- *Eclogae Geol. Helv.*, 81(1): 63-114.
- BURRI, M. 1997. Géologie récente de Finges et de ses environs (VS).- *Bull. de la Murithienne*, 115: 5-27.
- ESCHER, A. 1988. Structure de la nappe du Grand Saint-Bernard entre le val de Bagnes et les Mischabel.- *Geol. Bericht, Landeshydrologie und -geologie*, 7.
- GERLACH, H. 1883. Die Penninischen Alpen.- *Mat. carte géol. Suisse*, 27.
- LUGEON, M. 1898. L'éboulement de Sierre en Valais.- *Le Globe*, 27: 82-85.
- JACQUOD, J. 1995. *Etude hydrogéologique du versant sud de la zone Finges-Chippis (Valais, Suisse)*.- Diplomarbeit, Cycle postgrade, Centre d'Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel, nicht publiziert.
- MAMIN, M. 1996. *Hydrogéologie du Bois de Finges. Intégration des méthodes hydrogéologiques et hydrochimiques pour définir les écoulements de l'aquifère du Bois de Finges (Valais, Suisse)*.- Diplomarbeit, Cycle postgrade, Centre d'Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel, nicht publiziert.
- MONNET, R. 2001. *Utilisation et développement de la géophysique de surface et de forage pour la détermination des paramètres hydrauliques. Exemple de l'aquifère poreux complexe du Bois de Finges (Valais, Suisse)*.- Doktorarbeit, Univ. Lausanne.
- NUSSBAUM, F. 1942. Die Bergsturzlandschaft von Siders im Wallis.- *Actes Soc. Suisse Sc. Nat.*, Session 122: 11-12.
- SCHÜRCH, M., C. CASACCI, C. JAWECKI, 1999. Quantification des apports d'eau souterraine d'un aquifère alluvial complexe dans la vallée supérieure du Rhône (Bois de Finges, Valais central, Suisse) : modèle d'écoulement et modèle de transport.- *Hydrogéologie*, 99/3: 3-10.
- SCHÜRCH, M., R. MONNET, F.-D. VUATAZ, D. CHAPPELLIER 2001. Hydraulic parameters in a porous aquifer: hydrogeological and geophysical logging methods.- *European Journal of Environment and Engineering Geophysics* (im Druck).
- SCHÜRCH, M., F.-D. VUATAZ, 2000. Groundwater components in the alluvial aquifer of the alpine Rhone River valley, Bois de Finges area, Wallis Canton, Switzerland.- *Hydrogeology Journal*, 8/5: 549-563.
- SCHÜRCH, M. 2000. *Détermination des paramètres hydrauliques et hydrochimiques d'un aquifère alluvial dans une vallée alpine (Valais, Suisse)*.- Doktorarbeit, Univ. Neuchâtel.