



Hydrologie der Schweiz

Ausgewählte Aspekte und Resultate

M. Spreafico und R. Weingartner

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque
Nr. 7 – Bern 2005



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation
Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti,
dell'energia e delle comunicazioni

Hydrologie der Schweiz

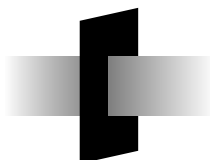
Ausgewählte Aspekte und Resultate

M. Spreafico und R. Weingartner

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque
Nr. 7 – Bern 2005

Mit Beiträgen von:

M. Auer, Ch. Graf, A. Grasso, Ch. Hegg, A. Jakob, A. Käab, Ch. Könitzer, Ch. Lehmann, R. Lukes, M. Maisch
R. Meister, F. Paul, T. Reist, B. Schädler, M. Spreafico, J.-P. Tripet, R. Weingartner



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

7 Grundwasser

Kennziffern

Trink- und Brauchwassergewinnung in der Schweiz im Jahr 2001

Quelle: SVGW 2004

Herkunft	Volumen	Anteil
Grundwasser aus Förderbrunnen	377 Mio m ³	36 %
Grundwasser aus Quellen	491 Mio m ³	48 %
Seewasser	168 Mio m ³	16 %
Total	1036 Mio m ³	100 %

Grundwasservorkommen in der Schweiz

Quellen: BITTERLI et al. 2004, DOERFLIGER & ZWAHLEN 1998, GUILLEMIN & ROUX 1992, POCHON & ZWAHLEN 2003, SVGW 2004

Grundwasserleiter	Flächenanteil	Anteil an Wassergewinnung	Fließdauer pro 1 km
Lockergesteins-Grundwasserleiter	ca. 6 %	36 %	6 Monate bis 2 Jahre
Karst-Grundwasserleiter	ca. 16 %	18 %	5 bis 50 Stunden
Kluftgesteins-Grundwasserleiter	ca. 78 %	30 %	2 Tage bis 1 Jahr

7.1 Wasser im Untergrund

Das Grundwasser ist der unterirdische, weitgehend unsichtbare Teil des natürlichen Wasserkreislaufs; Wissenschaft des Grundwassers ist die Hydrogeologie. Gesteinsabfolgen, die Grundwasser enthalten und geeignet sind es weiterzuleiten, werden als Grundwasserleiter bezeichnet.

7.1.1 Grundwasser und Hydrogeologie

Grundwasser ist das Wasser, das Hohlräume (Poren, Trennflächen, Klüfte) im Gestein zusammenhängend ausfüllt. Grundwasser wird vor allem durch Versickerung von Niederschlagswasser und Wasser aus Fließgewässern gebildet. Es bewegt sich ausschliesslich unter dem Einfluss der Schwerkraft und kann Tiefen von mehreren Tausend Metern erreichen. Das Grundwasser fließt von den Infiltrationsgebieten in Richtung

der Exfiltrationsgebiete (vgl. Fig. 7-1). Grundwasser kann unterirdisch in Oberflächengewässer übertreten, an der Oberfläche natürlich austreten (Quellen) oder künstlich gefasst werden (Förderbrunnen). Quellen sind damit eine besondere Erscheinungsform des Grundwassers. Eine direkte Messung der Eigenschaften des Grundwassers und des entsprechenden Grundwasserleiters an jedem Punkt der Erdkruste ist unmöglich. Hydrogeologische Studien benötigen deshalb weitgehend indirekte Methoden sowie Interpretationen.

Die Kenntnis der geologischen und hydrologischen Verhältnisse und der physikalischen Gesetze bezüglich Herkunft, Vorkommen, Bewegung und Eigenschaften des Grundwassers ist Aufgabe der Hydrogeologie. Sie stellt auch die Anwendung und Nutzung dieser Kenntnisse für die Erkundung, die Erschliessung und den Schutz des Grundwassers sicher (CASTANY & MARGAT 1977, GHO 1982, HÖLTING 1996, MÜLLER 1999).

7.1.2 Grundwasserleiter

Viele Gesteine sind geeignet, Grundwasser zu enthalten und weiterzuleiten. Unter den Grundwasserleitern werden drei Haupttypen unterschieden: Lockergesteins-, Karst- sowie Kluft-Grundwasserleiter (BUWAL 2004).

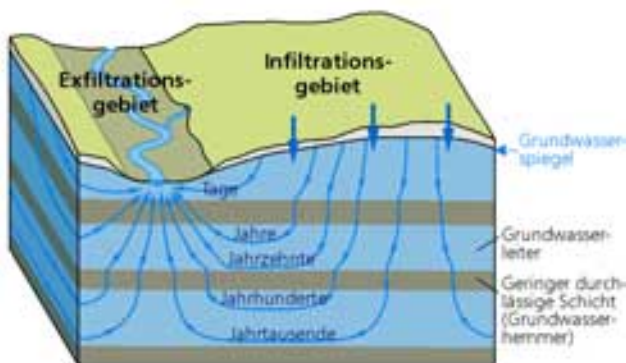


Fig. 7-1: Erläuterungsskizze Grundwasser: Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete, Fließrichtungen und Verweilzeiten (nach BOUZELBOUDJEN et al. 1997).

Gesteinsart	Durchlässigkeit	
	K-Wert	Beschreibung
Kiesig-sandiger Schotter	10^{-2} – 10^{-3}	hoch
Schotter, sandig bis siltig	10^{-4}	mittel
Lehmreicher Schotter	10^{-5}	mittel bis gering
Feinsand, Silt, Ton, Lehm	$< 10^{-5}$	gering bis sehr gering

Tab. 7-1: Durchlässigkeit von Lockergesteinen: Größenordnung (K-Wert) in m/s und Beschreibung (nach: SGK ab 1972).

Bei Lockergesteins-Grundwasserleitern (z.B. Kies, Sand) fließt das Grundwasser durch die Poren im Gefüge. Die Fließgeschwindigkeit beträgt in der Regel wenige Meter pro Tag. Die Eignung eines Gesteins, das Wasser zu leiten, wird vom Gesetz von Darcy beschrieben (vgl. z.B. HÖLTING 1996). Entscheidend sind das Gefälle und die Durchlässigkeit (K-Wert) (s. Tab. 7-1 und Fig. 7-2).

$$Q = K \cdot S \cdot i$$

mit: Q Durchfluss durch einen Grundwasserquerschnitt [m³/s]
 S Querschnittsfläche [m²]
 i Hydraulischer Gradient (Gefälle) [-]
 K Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Eine Zusammenstellung der geschätzten Durchlässigkeiten der geologischen Schichtabfolgen zwischen Jura und Alpen und unter dem Molassebecken ist in PFIFFNER et al. (1997) sowie BOUZELBOUDJEN et al. (1997) aufgeführt.

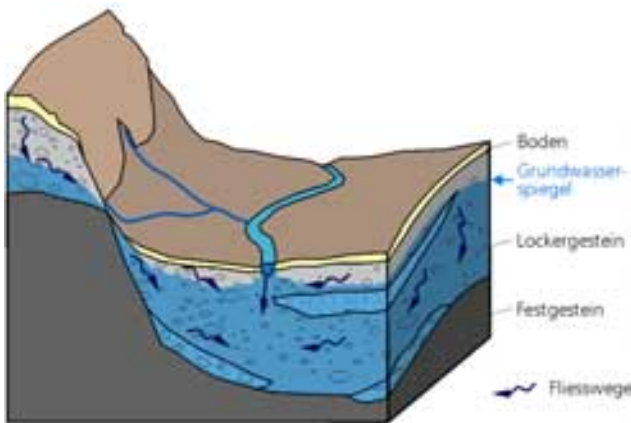


Fig. 7-2: Lockergesteins-Grundwasserleiter.

Gewisse Gesteine (z.B. Kalk) können verkarsten, d.h. bestehende Trennflächen können durch Lösungsprozesse erweitert werden und sich schliesslich zu einem dreidimensionalen Netz von offenen Klüften, Röhren und Höhlen entwickeln (vgl. Fig. 7-3). In solchen Karst-Grundwasserleitern sind die Fließgeschwindigkeiten räumlich und zeitlich sehr heterogen und können über mehrere zehn Meter pro Stunde betragen. Deshalb sind Grundwasservorkommen in Karst-Grundwasserleitern besonders empfindlich gegenüber Verschmutzungen.

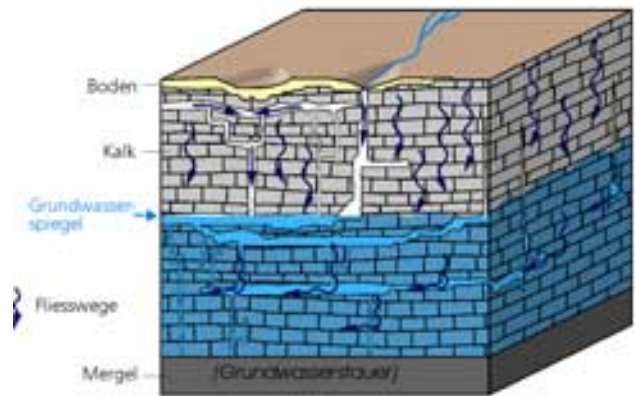


Fig. 7-3: Karst-Grundwasserleiter (Skizze nach DEMATTEIS et al. 1997).

Bei den Kluff-Grundwasserleitern (z.B. Molassesandsteine, Flysche, Granite) fließt das Grundwasser entlang von Trennflächen wie Klüften und Schichtfugen, je nach Gestein (z.B. Sandsteine) auch in Poren (vgl. Fig. 7-4). Die Fließgeschwindigkeit ist von der Öffnungsweite der Trennflächen und vom Vernetzungsgrad der Klüfte abhängig und kann von wenigen Metern bis zu mehreren hundert Metern pro Tag betragen.

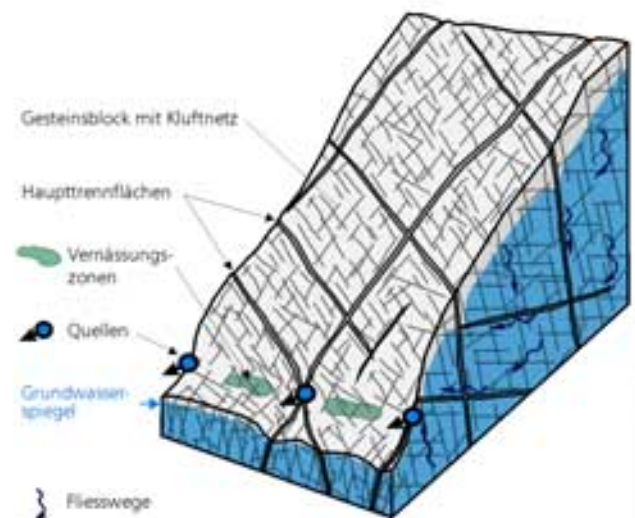


Fig. 7-4: Kluff-Grundwasserleiter (nach POUCHON & ZWAHLEN 2003).

7.2 Grundwasserstände und Quellschüttungen messen

Um quantitative Veränderungen der Grundwasserressourcen, die durch natürliche oder menschliche Einflüsse bedingt sein können, frühzeitig zu erkennen, ist eine langfristige, quantitative Beobachtung des Grundwassers notwendig. Diese stellt eine Grundlage für eine landesweite nachhaltige Wasserversorgung dar. Zu diesem Zweck ist das Nationale Beobachtungsnetz der Grundwasserstände und Quellschüttungen seit 1975 in Betrieb.

Im Allgemeinen wird der Grundwasserstand in einem gelochten Rohr (Piezometer, Förderbrunnen), das im Grundwasserleiter eingebaut ist, manuell (mit einem Lichtlot) oder automatisch gemessen (s. Fig. 7-5).

Die automatischen Messungen erfolgen mit Hilfe eines Schwimmers, eines Pneumatikpegels (Einperleinrichtung) oder einer Drucksonde. Die Daten werden entweder analog auf Papier (Umlauftrommel) aufgezeichnet oder digital auf einem Modul gespeichert. In einem Piezometer wird in der Regel der natürliche Grundwasserstand gemessen, in einem Förderbrunnen ist der Wasserstand durch den Förderbetrieb beeinflusst.

Die Quellschüttung wird möglichst nahe beim Quellaustritt an einem natürlichen Querschnitt oder mit Hilfe eines künstlichen Überlaufs gemessen. Analog zur Abflussmessung an Oberflächengewässern wird der Wasserstand erfasst; die Schüttung (Abfluss) wird daraus mit Hilfe der Abflusskurve bestimmt (vgl. Kap. 5).

Das nationale Beobachtungsnetz der Grundwasserstände und Quellschüttungen (NABESS) umfasst derzeit 41 Piezometer und 2 Quellen und erlaubt eine allgemeine nationale Übersicht (vgl. Fig. 7-6). Eine erste Synthese über die Ergebnisse des Messnetzes NABESS haben BUTTET & EBERHARD (1995) erstellt. Die Tagesmittelwerte stehen dem interessierten Publikum zur Verfügung (s. www.bwg.admin.ch; s. auch «Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz», z.B. BWG 2004). Quantitative Grundwasserdaten werden auch gezielt von Kantonen, Hochschulen und privaten Organisationen erhoben; rund 1000 Stationen (Piezometer, Förderbrunnen, Quellen) konnten gesamtschweizerisch bei einer Bestandaufnahme identifiziert werden (SCHÜRCH et al. 2004; s. auch www.bwg.admin.ch).

Nebst der Messung der Grundwassermenge ist die Kontrolle seiner Qualität von entscheidender Wichtigkeit für die Trinkwassernutzung. Fragen der Wasser-

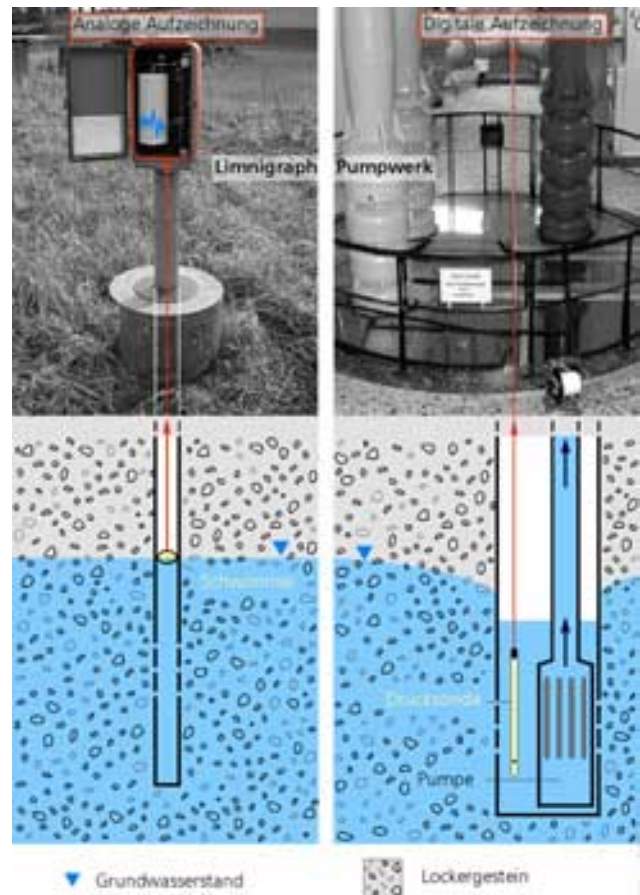


Fig. 7-5: Messprinzip und Datenerfassung mittels Piezometer (links) und Förderbrunnen (rechts) (nach SCHÜRCH et al. 2004).



Fig. 7-6: Eidgenössische Stationen zur Messung von Grundwasserständen und Quellschüttungen (Stand 2003) vor dem Hintergrund der dominierenden Grundwasserleitertypen (Hydrogeologische Übersichtskarte der Schweiz).

qualität im Allgemeinen werden in Kapitel 9, die Qualität des Grundwassers im Besonderen in Kapitel 7.4 behandelt.

7.3 Grundwasserregime

Die Grundwasserneubildung ist durch einen jahreszeitlichen Rhythmus geprägt. Dies führt zu Schwankungen des Grundwasserspiegels und der Quellschüttungen. Bei den sehr ergiebigen Grundwasservorkommen in gut durchlässigen Schottern der ausgedehnten Flusstäler z.B. erfolgt die Grundwasserneubildung überwiegend durch die Flussinfiltration, mit Maxima meist im Frühling und Sommer.

Bei den grossen alpinen Flüssen Aare, Reuss, Rhein, Rhone und Inn wird das Grundwasser vor allem im Frühling und Sommer durch das Schnee- und Gletscherschmelzwasser gespeist. Aus diesem Grund lagen die Grundwasserstände in den Talschottern dieser Flüsse selbst im ausgeprägt trockenen Sommer 2003 zwar generell tief, aber über dem langjährigen Minimum, wie z.B. bei Wartau (SG) (BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004) (vgl. Fig. 7-9).

Abflüsse und Grundwasserneubildung kleinerer Einzugsgebiete des Mittellandes sind durch den Verlauf

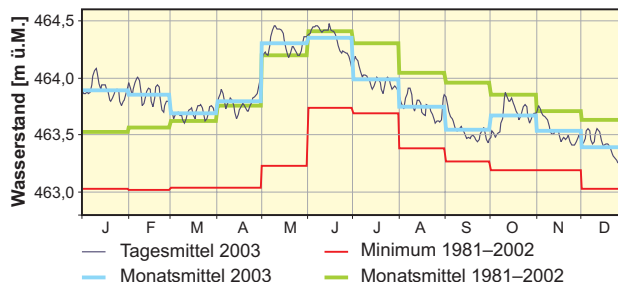


Fig. 7-9: Saisonale Grundwasserstände im Flussschotter: Rhein – Wartau Weite B (SG) (nach BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004).

der Niederschläge und der Evapotranspiration bestimmt. Überdurchschnittlich trockene Perioden können hier zu einem Defizit bei der Grundwasserneubildung führen, wie aus dem Vergleich der Ganglinie der Monatsmittel mit dem langjährigen mittleren Jahresgang des Grundwassers bei Nebikon (Wiggertal, LU) ersichtlich ist (vgl. Fig. 7-7).

In einem Karst-Grundwasserleiter bewegt sich das Grundwasser sowohl in einem zusammenhängenden Netz von Karströhren (Karstnetz) wie auch in zerklüfteten und im Allgemeinen gering durchlässigen Gesteinsmassen. Das Karst-Grundwasser tritt an der Oberfläche meistens als Quelle aus, deren Ergiebigkeit stark in

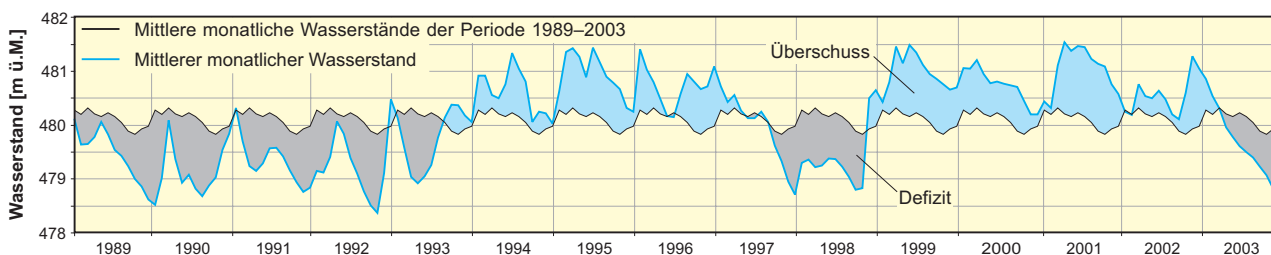


Fig. 7-7: Grundwasserbilanz Nebikon – Winkel (LU). Vergleich der mittleren monatlichen Grundwasserstände der Einzeljahre mit denjenigen der Periode 1989–2003 (nach SCHÜRCH et al. 2004).

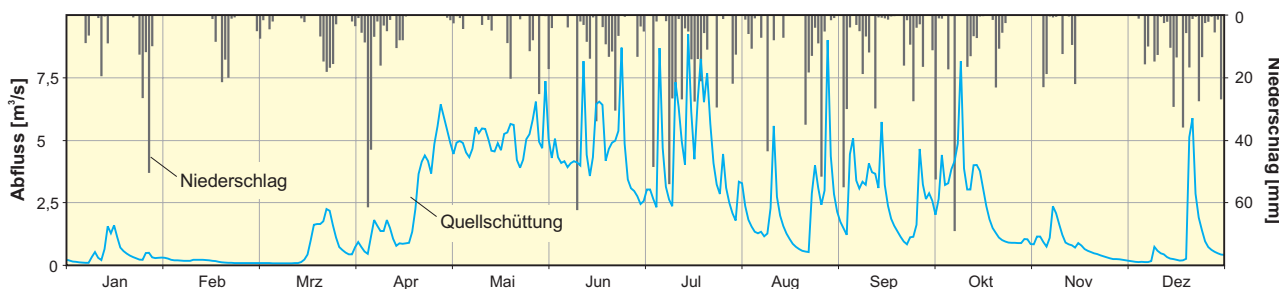


Fig. 7-8: Quellschüttung aus Karst-Grundwasserleiter im Jahr 1993: Schlichenden Brunnlen, Muotathal (SZ) mit Niederschlägen der Station Bisisthal (nach SCHÜRCH et al. 2004).

Abhängigkeit der Witterungsbedingungen variiert. Die Ganglinie der Tagesmittel für die Quelle Schlichenden Brünnen (SZ) (Fig. 7-8) illustriert die typischen Hydrogramme dieser Quellen mit einer raschen und starken Zunahme bei Niederschlagsereignissen bzw. einer raschen Abnahme der Schüttungsmenge danach sowie einer langsamen Abnahme in Zeiten mit wenig Niederschlag (vgl. Periode vom 9. Oktober bis 21. Dezember 1993 in Fig. 7-8).

7.4 Die Qualität des Grundwassers

Über 80 % der Trink- und Brauchwasserversorgung der Schweiz wird aus Grundwasser gedeckt. Grundwasser muss somit im Hinblick auf seine langfristige Erhaltung nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ landesweit beobachtet werden. Das Nationale Netz zur Beobachtung der Grundwasserqualität soll diese Anforderung erfüllen.

7.4.1 Instrumente der landesweiten Beobachtung

Die Umsetzung von Grundwasserschutzmassnahmen verlangt ausreichende und langjährige Datenreihen über den Grundwasserzustand. Bis anhin erhoben kantonale Labors, Wasserversorgungen und zunehmend auch kantonale Gewässerschutzämter solche Daten im Hinblick auf ihre spezifischen Fragestellungen. Datenreihen wurden auch von Hochschulen erhoben (KILCHMANN 2001).



Fig. 7-10: Messstellen NAQUA_{TREND} (Stand 2003) mit hauptsächlicher Bodennutzung im hydrogeologischen Einzugsgebiet (Daten aus Messnetz NAQUA_{TREND}).

Da auch eine nationale Übersicht gewährleistet werden muss, wurde 1997 das Nationale Netz zur Beobachtung der Grundwasserqualität NAQUA ins Leben gerufen. Im Endausbau wird das Modul NAQUA_{TREND} fünfzig möglichst repräsentativ über die ganze Schweiz verteilte Messstellen zur langfristigen Beobachtung umfassen; Ende 2003 waren davon 48 in Betrieb (vgl. Fig. 7-10). Das Modul NAQUA_{SPEZ} erlaubt an ca. 500 Messstellen gezielte Kampagnen zu speziellen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Qualität des Grundwassers.

7.4.2 Vorgehensschritte zur Datenbeschaffung

Wahl der NAQUA-Messstellen, Probenahme und Analytik müssen strenge Anforderungen erfüllen (BUWAL / BWG 2002 und 2004, GREBER et al. 2002). Für die Auswahl der Messstellen wurde auf bereits bestehende Förderbrunnen, Quellwasserfassungen und Piezometer zurückgegriffen. Das Messprogramm ist modulartig im Baukastensystem aufgebaut (vgl. Fig. 7-11). Es basiert auf einem Grundprogramm und zusätzlichen, jederzeit anpassbaren Zusatzprogrammen. Der Einsatz der Zusatzprogramme hängt von der potentiellen anthropogenen Belastungssituation (z.B. Landwirtschaft, Verkehr), den natürlichen Einflussfaktoren der jeweiligen Station und den vorhergehenden Analyseergebnissen ab. Die vom beauftragten Labor abgelieferten Analysenergebnisse werden umgehend einer ersten Auswertung unterzogen, so dass auch kurzfristig Anpassungen bei den Zusatzprogrammen künftiger Messungen eingeleitet werden können. Grundwasserproben werden – bei den Brunnen und Piezometern – erst nach ausreichendem Vorpumpen und nach Erreichen konstanter Werte der kontinuierlich aufgezeichneten Feldparameter abgefüllt.

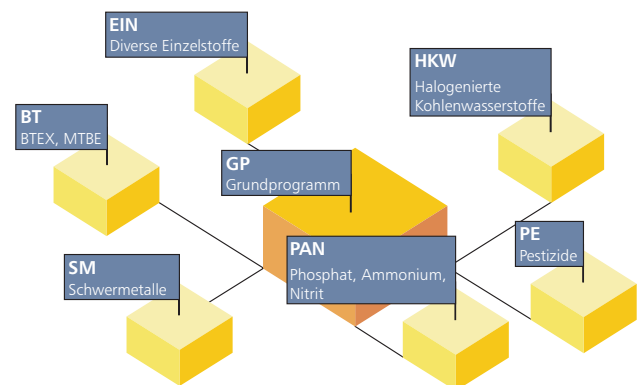


Fig. 7-11: Modulaufbau NAQUA – Das Grundprogramm kann mit bis zu sechs Zusatzprogrammen kombiniert werden (nach GREBER et al. 2002).

7.4.3 Darstellung ausgewählter Messreihen

Die dichte Besiedlung der Schweiz und die intensive Nutzung des Landes hinterlassen ihre Spuren im Grundwasser. Die Befunde zeigen, dass das schweizerische Grundwasser und damit das Trinkwasser eine sehr gute Qualität aufweisen, denn die gefundenen Werte liegen nach heutigem Stand des Wissens in einer Gröszenordnung, in welcher keine Gesundheitsgefährdung zu erwarten ist. Die Werte sind hingegen als deutlicher Hinweis darauf zu werten, dass mit den Bemühungen zum Schutz der Grundwasservorkommen intensiv weitergefahren werden muss (BUWAL / BWG 2004).

Von den Hauptinhaltsstoffen des Grundwassers ist Nitrat der markanteste Indikator zur Beobachtung des Einflusses der Bodennutzung. Als Hauptquelle des Nitrats im Grundwasser ist die landwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung zu bezeichnen. Das Nitrat gelangt durch Auswaschung des Bodens und über das infiltrierende Niederschlagswasser ins Grundwasser. Figur 7-12 zeigt beispielhaft die mittleren und die maximalen Nitratwerte für alle NAQUA-Messstellen in den Jahren 2002–2003, gruppiert nach der Hauptbodennutzung. Die Graphik belegt, dass die Bodennutzung markant die Nitratgehalte im Grundwasser und somit auch dessen Qualität bestimmt. Die verfügbaren Daten lassen zudem den Schluss zu, dass zwischen den Perioden 1989–1991 (kantonale Daten) und 2002–2003 (NAQUA-Daten) der mittlere Nitratgehalt in den schweizerischen Grundwasservorkommen abgenommen hat.

Einen wichtigen Grund für die beobachtete durchschnittliche Abnahme dürften generelle Veränderungen in der Landwirtschaft darstellen. Seit 1999 unterstützt der Bund zudem Sanierungsprojekte, um die unerwünschte Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser

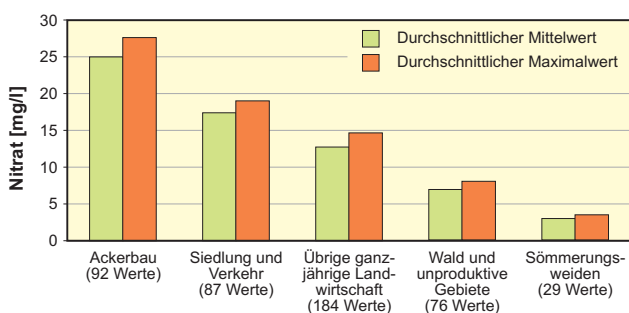


Fig. 7-12: Durchschnittlicher mittlerer und maximaler Nitratgehalt in Abhängigkeit der Hauptbodennutzung für die beprobten NAQUA-Messstellen (Periode 2002–2003) (nach BUWAL / BWG 2004).

zu vermindern. Dabei verpflichten sich die Betriebe zu besonders wasserschonenden Produktionsmethoden (z.B. Umstellung von Ackerflächen auf Dauergrünland mit extensiver Beweidung) (MEYLAN 2003). Die beiden in Figur 7-13 dargestellten exemplarischen Ganglinien zeigen mögliche Entwicklungen des Nitratgehaltes, je nach lokalen Verhältnissen. Während die Messstelle mit Nitratprojekt seit ca. 1995 eine deutliche Abnahme des Nitratgehaltes zeigt, erhöhte sich dieser in der Messstelle ohne Nitratprojekt bis 1996 deutlich und konnte seither, insbesondere durch die tiefgreifenden Veränderungen in der Landwirtschaft, etwa auf das Niveau von 1989 gesenkt werden.

Im Rahmen des Spezialprogrammes NAQUA_{SPZ} (Phase 2002) wurden Pflanzenschutzmittel (am häufigsten

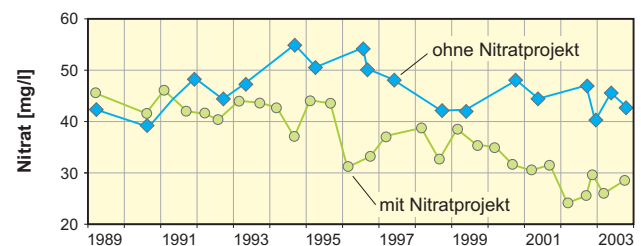


Fig. 7-13: Zwei Förderbrunnen im östlichen Mittelland (Schotter ausserhalb des Einflussbereichs eines Fließgewässers). Hauptbodennutzung Ackerbau (nach BUWAL / BWG 2004).

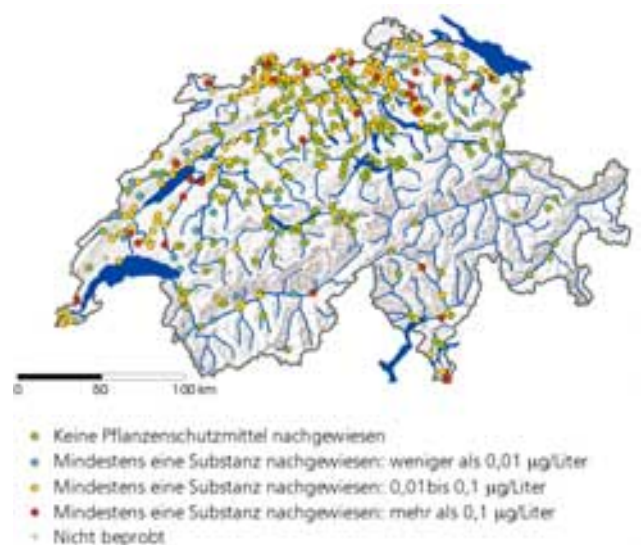


Fig. 7-14: Maximale Gehalte an Pflanzenschutzmitteln im Grundwasser im Jahr 2002. Die Gewässerschutzverordnung (GSchV 1998) legt als Anforderung für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird, eine maximale Konzentration an Pflanzenschutzmitteln von 0,1 µg/l je Einzelstoff fest (nach BUWAL / BWG 2003).

das Totalherbizid Atrazin und sein Abbauprodukt Desethylatrazin) in einer grossen Zahl von Messstellen nachgewiesen (vgl. Fig. 7-14). Nach heutigem Wissensstand handelt es sich dabei um gesundheitlich unbedenkliche Spuren. Ihr Auftreten im Grundwasser muss aber aufmerksam verfolgt werden (BUWAL / BWG 2003, 2004).

Der Spurenstoff Bor kann geogenen und/oder anthropogenen Ursprungs sein. In der Natur ist er u.a. in zahlreichen Mineralien enthalten. Im Zusammenhang mit menschlichen Aktivitäten befindet er sich in der Schweiz vor allem im kommunalen Abwasser (Waschmittel und Medikamente), aber auch in zahlreichen industriellen Produkten, Düngemitteln und Insektiziden. Deshalb kann er als Indikator für allgemeine anthropogene Beeinflussungen wie z.B. Deponieeinflüsse verwendet werden. Beim gegenseitigen Vergleich von Bor und Natrium – ein Hauptinhaltsstoff, der ebenfalls geogenen oder anthropogenen Ursprungs sein kann – ergibt sich eine positive Korrelation (vgl. Fig. 7-15). Bei gleichzeitigem Nachweis höherer Konzentrationen von Bor und Natrium (GREBER et al. 2002, MATTHESS 1994, MERKEL & SPERLING 1996) ist die Wahrscheinlichkeit anthropogener Verunreinigung gross.

7.5 Grundwasser als Lebensraum

In den Grundwasserleitern lebt eine Vielzahl unterschiedlichster einzelliger Mikroorganismen wie Bakterien und Protozoen. In speziellen Grundwasserhabitaten können auch kleine vielzellige tierische Lebewesen beobachtet werden. Diese Fauna besteht mehrheitlich aus Mikrokrustazeen. Alle autochthonen mikrobiellen Arten sind harmlos und diese natürliche Lebensgemeinschaft (Biozönose) verstärkt die Reinigungsfunktion in den Grundwasserleitern. Gemäss Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 soll die Biozönose unterirdischer Gewässer «naturnah und standortgerecht» sein sowie «typisch für nicht oder nur schwach belastete Gewässer». Gegenwärtige Studien haben zum Ziel, Beurteilungskriterien für natürliche Biozönosen im Grundwasserbereich zu definieren.

7.5.1 Lebewesen im Grundwasserbereich

Untersuchungen über Mikroorganismen im Grundwasser konzentrierten sich bisher meist auf zwei Aspekte: das Vorkommen und den Transport von pathogenen Mikroorganismen und die Rolle von Bakterien beim Schadstoffabbau. Durch die rasanten methodischen Fortschritte im Bereich der molekularen Mikrobiologie

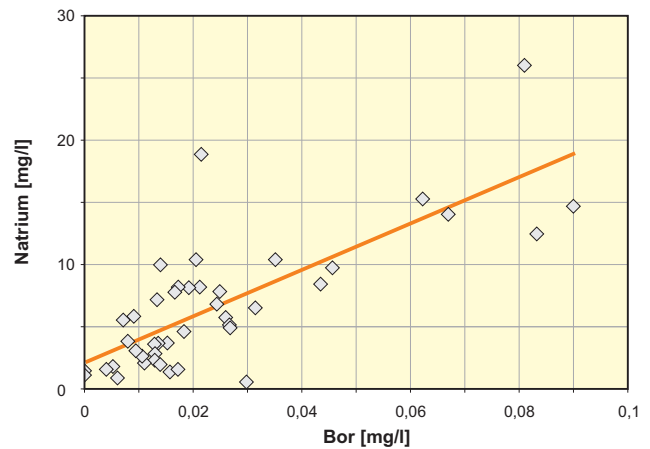


Fig. 7-15: Korrelation zwischen Bor und Natrium als Indikator möglicher anthropogener Beeinflussung (Daten aus Messnetz NAQUA_{TREND}, Periode 1999–2002).

wurde jedoch zunehmend erkannt, dass auch in unverschmutzten Grundwasserleitern eine Vielzahl unterschiedlichster Mikroorganismen lebt, vor allem Bakterien, aber auch Archebakterien, Protozoen und Bakteriophagen (GIBERT et al. 1994, GRIEBLER & MÖSSLACHER 2003, HUNKELER et al. in Vorb.). Wie die Bakterien bilden die Archebakterien eine wichtige Gruppe primitiver einzelliger Lebewesen, deren Zellen keinen Zellkern aufweisen; beide Gruppen sind genetisch grundlegend verschieden. Protozoen sind ebenfalls einzellige Lebewesen, die jedoch einen Zellkern besitzen. Bakteriophagen sind eine Art Viren, deren Wirtszellen Bakterien sind; die Viren brauchen für ihre Entwicklung eine lebende Zelle. Die Grösse einer Bakterie beträgt mehrheitlich 0,5 bis 2 Mikrometer, diejenige der Protozoen, je nach Art, mehrheitlich 2 bis 200 Mikrometer.

Diese Mikroorganismen können natürlicherweise und dauerhaft im Grundwasserbereich leben oder von ausserhalb stammen (autochthoner bzw. allochthoner Charakter). Die Herkunft der allochthonen Arten kann anthropogen oder natürlich sein. Zahlreiche Arten sind harmlos; die Bedeutung der pathogenen Arten ist vor kurzem analysiert worden (AUCKENTHALER & HUGGENBERGER 2003). Es scheint so zu sein, dass alle autochthonen Arten harmlos sind, während alle pathogenen Arten allochthon sind (HUNKELER et al. in Vorb.).

Neben den Mikroorganismen kann im Karstgrundwasser sowie in gewissen Lockergesteins-Grundwasserleitern auch eine Fauna beobachtet werden. Mit wenigen Ausnahmen sind diese Lebewesen sehr klein (kleiner als 3 mm). Auch diese Kleintiere können autochthonen

bzw. allochthonen Charakters sein. Die in der Schweiz bekannten, ausschliesslich im Grundwasserbereich lebende Arten sind vor allem Krustazeen, Insekten, Nematoden und Mollusken; dabei stellen die Krustazeen den Grossteil der bekannten Arten dar (HUNKELER et al. in Vorb., persönliche Mitteilung P. Moeschler). In der Schweiz leben gewisse Arten, die jeweils nur in einer beschränkten Region bekannt (endemische Arten) und deswegen besonders schützenswert sind; z.B. die Mikrokrustazee *Gelyella monardi* (s. Fig. 7-16).



Fig. 7-16: Die Mikrokrustazee *Gelyella monardi* wurde zum ersten Mal im Karst-Grundwasserleiter, der die Quelle Combe-Garot (NE) speist, identifiziert. Sie lebt ausschliesslich im Grundwasser und ist 0,3 mm lang (Zeichnung C. Marendaz nach MOESCHLER & ROUCH 1988).

Die Grundwasserfauna kann als natürlicher Indikator für hydrogeologische Untersuchungen verwendet werden; z.B. haben MOESCHLER et al. (1982, 1988) diese Fauna, insbesondere Mikrokrustazeen, für die Analyse der hydrodynamischen Verhältnisse in Karst-Grundwasserleitern verwendet. Dabei wurde Quellwasser kontinuierlich beprobt, die Individuen der Mikrofauna gezählt und dann deren Anzahl mit der Ganglinie der Quellschüttung verglichen und interpretiert (Fig. 7-17).

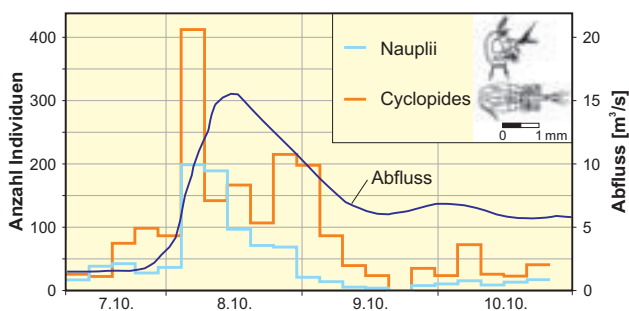


Fig. 7-17: Häufigkeit verschiedener Mikrokrustazeen in der Quelle der Areuse (NE) während des Hochwasserereignisses vom 8. Oktober 1980 (nach MOESCHLER et al. 1982).

7.5.2 Der Grundwasserbereich als Ökosystem

Die Bundesgesetzgebung verlangt die Erhaltung natürlicher Lebensräume für die einheimische Tier- und Pflanzenwelt (Gewässerschutzgesetz vom 24. Januar 1991) und legt fest, dass für unterirdische Gewässer die Biozönose naturnah und standortgerecht sein soll sowie zudem typisch für nicht bzw. nur schwach belastete Gewässer (Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998). Die gegenwärtige Gesetzgebung stellt demnach nicht nur Anforderungen an die chemische und mikrobiologische Wasserqualität, sondern definiert auch ökologische Ziele für das Grundwasser, was einer Neuorientierung im Grundwasserschutz gleichkommt. Diese Situation ist auch eine wissenschaftliche Herausforderung: Eindeutige Beurteilungskriterien und Methoden für die Definition und den Nachweis natürlicher Biozönosen im Grundwasserbereich müssen erst noch entwickelt werden. Entsprechende Studien sind im Gange (HUNKELER et al. in Vorb.). Bei dieser interdisziplinären Fragestellung werden die Erd-, Wasser- und Lebenswissenschaften gemeinsam gefordert.

In HUNKELER et al. (in Vorb.) sind die Merkmale mikrobieller Gemeinschaften im Grundwasser zusammengestellt. Der Lebensraum Grundwasser zeichnet sich durch die Abwesenheit von Licht sowie meist durch einen Mangel an organischem Kohlenstoff und Nährstoffen aus. Die Mikroorganismen befinden sich teils in einem Zustand reduzierter Aktivität. Die Bakterien finden die für sie essentiellen Elemente wie Wasserstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff sowie ihre Nährstoffe, z.B. Stickstoff, Phosphor, Kalium oder Schwefel, im Grundwasserbereich. Zwischen den Bakterien und den Mineralkörnern des Gesteins bzw. den im Grundwasser transportierten gelösten und ungelösten Substanzen finden vielfältige Wechselwirkungen statt. Bakterien können die Oberfläche der Mineralkörner besiedeln. Diese natürliche Lebensgemeinschaft verstärkt die Reinigungsfunktion im Grundwasserleiter. Organischer Kohlenstoff wird von gewissen Bakterien konsumiert, welche von Protozoen vertilgt werden, die wiederum die Nahrungsgrundlage für die Mikrofauna bilden. Die räumliche geochemische Heterogenität der Grundwasserleiter spiegelt sich in der Heterogenität der mikrobiellen Gemeinschaften wider. Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Bereichen der Grundwasserleiter (z.B. Kapillarsaum als Grenzbereich zwischen wassergesättigter und -ungesättigter Zone, Grenzflächen zwischen unterschiedlichen lithologischen Einheiten wie Tonlinsen und Kies oder Grundwasserleiter und -stauer) zeichnen sich oft durch besonderen Artenreichtum aus und werden als Ökotope bezeichnet.

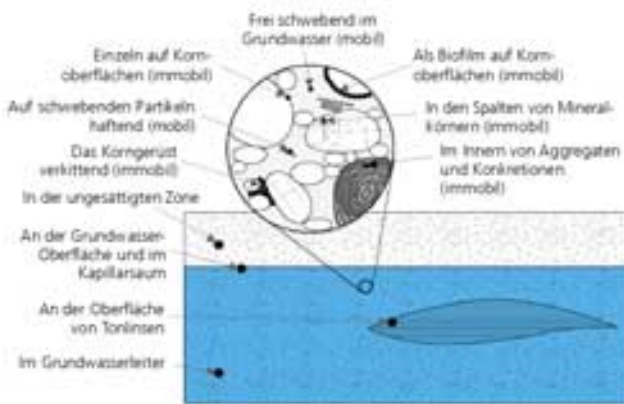


Fig. 7-18: Vorkommen von Mikroorganismen (Habitate und Mikrohabitate) in einem Lockergesteins-Grundwasserleiter (nach HUNKELER et al. in Vorb.).

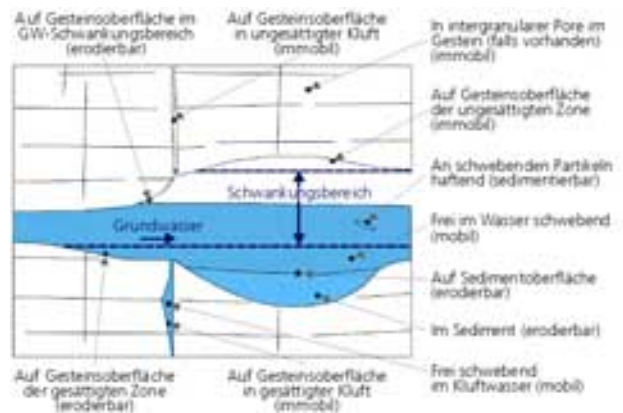


Fig. 7-19: Karst-Grundwasserleiter bieten eine Vielzahl unterschiedlicher Habitate für Mikroorganismen (nach HUNKELER et al. in Vorb.).

Typische Habitate für Mikroorganismen im Grundwasserbereich sind in den Figuren 7-18 und 7-19 dargestellt. Bei manchen Grundwasserhabitaten sind auch starke zeitliche Variationen in der Besiedlung durch Mikroorganismen zu beobachten.

7.6 Anwendung von Tracern im Grundwasser

In der angewandten Hydrogeologie werden verschiedene Methoden wie geologische Kartierung, geophysikalische Untersuchungen, Bohrungen und Markierung des Grundwassers eingesetzt. Zur Markierung werden künstliche oder natürliche Tracer verwendet. Der Entwicklungsstand dieser Methodik entspricht den heute gestellten, hohen Ansprüchen bei der Untersuchung der Stoffausbreitung im Untergrund und beim Grundwasserschutz im Allgemeinen.

7.6.1 Einsatz künstlicher Tracer

Das Prinzip ist einfach: Mit Hilfe eines noch bei grosser Verdünnung nachweisbaren Markierstoffes (engl. Tracer) wird Wasser markiert, um seine Ausbreitung verfolgen zu können (vgl. Fig. 7-20). Die Tracerankunft wird durch eine geeignete Beprobung an den möglichen Wiederaustrittsstellen beobachtet und analytisch im Feld oder im Labor quantitativ ermittelt. Die am häufigsten verwendeten Substanzen sind wasserlösliche Markierstoffe (Fluoreszenztracer und Salze) (BÄUMLE et al. 2001, SCHUDEL et al. 2002).

Die Markiertechnik ermöglicht es, folgende Fragen zu beantworten:

- Wohin fliesst das Wasser?
- Woher kommt es?
- Besteht zwischen zwei Punkten eine Verbindung?
- Wie breiten sich Stoffe im Wasser aus?
- Wie lange bleibt das Wasser im Untergrund?
- Wie gross ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers im Untergrund?

Mit dieser Methode können z.B. die Begrenzung des hydrogeologischen Einzugsgebietes einer Quelle oder hydraulische Parameter des Grundwasserleiters bestimmt werden. Die vorliegenden Tracerdurchgangskurven – auch Durchbruchkurven genannt – zeigen



Fig. 7-20: Markierversuch in einem Karstsystem, Covatanne-Schlucht (VD).

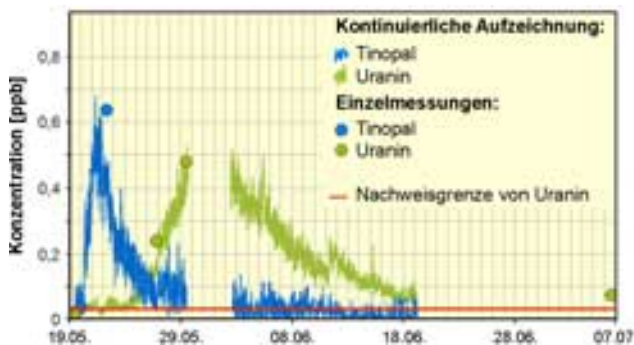


Fig. 7-21: Markierversuche an der Quelle von Livurcio (TI). Distanz Impfstelle-Quelle: 25 m (Tiopal), 80 m (Uranin), Einspeisung am 19.05.2000 (nach POCHON & ZWAHLEN 2003).

beispielhaft die Ergebnisse von Markierversuchen, die für die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen bei Kluft-Grundwasserleitern im Tessin durchgeführt wurden (vgl. Fig. 7-21 und Fig. 7-22).

Seit der Inbetriebnahme von INFO-TRACER, der zentralen Koordinationsstelle für Markierversuche im Grundwasser (www.bwg.admin.ch) im Jahre 1984, werden in der Schweiz jährlich 100–500 Versuche gemeldet.

7.6.2 Anwendung natürlicher Tracer

Die künstlichen Tracer eignen sich besonders für die Untersuchung von Grundwässern mit beschränkter Verweilzeit (z.B. einige Stunden bis einige Wochen), während die natürlichen Tracer (z.B. gelöste Stoffe, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, Mikrobiologie, Isotope) eher ein Langzeitbild oder eine grossräumige Information ergeben.

Die Isotope, die im Wasserkreislauf natürlich vorhanden sind, ohne dass eine künstliche Anreicherung für den Bedarf einer Studie vorgenommen wird, werden als Umweltisotope bezeichnet. In der angewandten Hydrologie und Hydrogeologie werden sie oft als natürliche Tracer verwendet. Dabei sind Sauerstoff-18, Deuterium und Tritium als Bestandteile des Wassermoleküls ideale Tracer. Sie werden keinen Wechselwirkungen mit der Umwelt unterzogen und ihre Bewegung ist identisch mit jener des Wassers. Sauerstoff-18 und Deuterium sind stabile Isotope; ihre Konzentration variiert mit den Phasenänderungen des Wassers. Tritium ist radioaktiv. Diese Eigenschaften sind Grund für die vielseitige Anwendbarkeit von Isotopen-Methoden (ETCHEVERRY 2002, PARRIAUX et al. 2001, SIEGENTHALER et al. 1983) (vgl. Kap. 10.5).

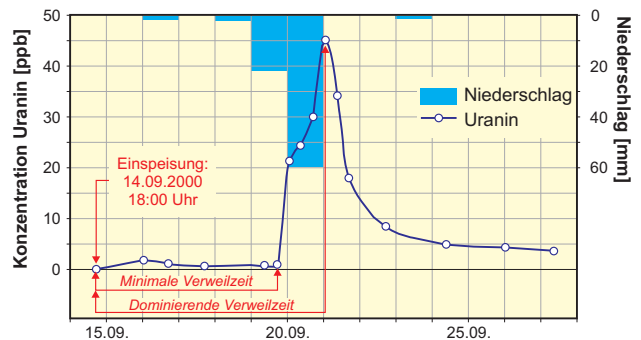


Fig. 7-22: Markierversuch an der Quelle Borgnone (TI), 14.–27.09.2000. Distanz Impfstelle-Quelle: 90 m (nach POCHON & ZWAHLEN 2003).

Figur 7-23 zeigt beispielhaft die Anwendung von Sauerstoff-18 als natürlichem Tracer für die quantitative Analyse der Grundwasserneubildung durch Flussinfiltration im Bereich Kappelen (Seeland). Das Grundwasser wird teilweise direkt durch die lokalen Niederschläge gespeist, teilweise durch Flussinfiltration. Das Einzugsgebiet des infiltrierenden Oberflächengewässers liegt bedeutend höher als dasjenige des Seelands. Somit hinterlässt Sauerstoff-18 einen unterschiedlichen «Fingerabdruck» im Niederschlag bzw. im Aarewasser. Durch die Anwendung eines Mischmodells mit zwei Komponenten kann der Anteil an infiltrierendem Aarewasser im Grundwasser ermittelt werden (WEA 1989).

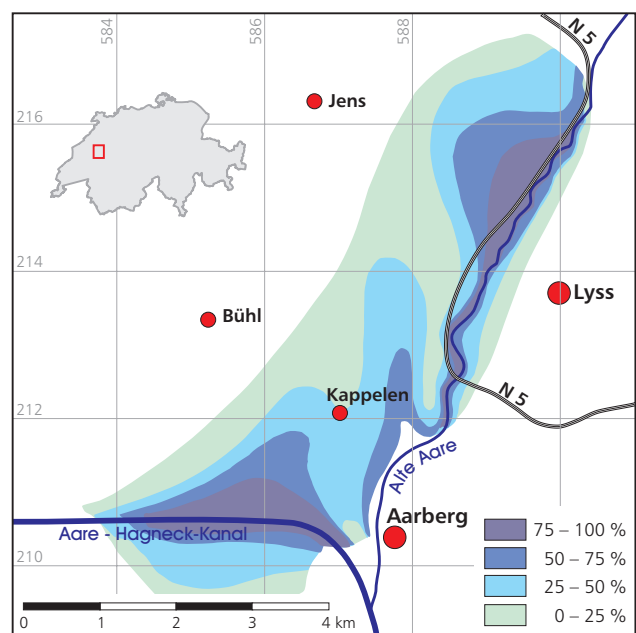


Fig. 7-23: Anteil Aareinfiltrat im Grundwasser, bestimmt aufgrund des Sauerstoffisotopen-Verhältnisses (Probenahmestellen – Piezometer – sind nicht dargestellt) (nach WEA 1989).

7.7 Wasser in geringdurchlässigen Gesteinen

Eine Herausforderung für die zeitgemässe Hydrogeologie, vor allem seit den achtziger Jahren, stellt die Untersuchung der geringdurchlässigen Gesteine dar. Die Entwicklung der Kenntnisse in diesem Bereich ist mit der Problematik der konventionellen Abfallentsorgung sowie der Endlagerung der radioaktiven Abfälle nötig geworden. In den letzten Jahren konnte in der Schweiz von neuen Untertagebauprojekten und Bohrungen Nutzen gezogen werden, um wichtige hydrogeologische Daten über diese Gesteine zu beschaffen. Das Felslabor Mont Terri z.B. wurde in der Abzweigung eines Autobahntunnels erstellt.

7.7.1 Geringe Durchlässigkeiten und Messanforderungen

Die geringdurchlässigen Gesteine kommen in Sediment- (z.B. Tonformationen) und in Kristallingesteinen (z.B. Granit) vor. Sie stellen keine eigentlichen Grundwasserleiter dar, da sie es nicht ermöglichen, Grundwasser in ausreichenden Mengen zu fördern. Sie sind jedoch in der Regel wassergesättigt und dieses Wasser, obschon in extrem langsamer Bewegung, ist Teil eines Grundwasserströmungssystems. Aus Figur 7-24 und Tabelle 7-2 ist ersichtlich, dass die Durchlässigkeit dieser Gesteine – z.B. des Opalinustons – ein Milliarden mal geringer als jene eines ergiebigen Grundwasserleiters sein kann. Diese Tatsache hat zur Folge, dass die hydrogeologisch relevanten Messgrössen extrem klein sind und dass die Messung der Eigenschaften dieser Gesteine sowie die Entnahme von Wasserproben sehr hohe Anforderungen an die Mess- und Beprobungs-



Fig. 7-24: Durchlässigkeit: Größenordnungen und Beschreibungen (nach TRIPET et al. 1990).

technologie stellt. Die Beeinflussung der natürlichen Gesteinsverhältnisse durch die Untersuchungsvorgänge (z.B. durch Bohrarbeiten) bzw. die Verformung der Messausrüstungen (z.B. durch mechanische oder thermische Beanspruchung) müssen bei der Versuchskonzipierung und -durchführung mit der grössten Aufmerksamkeit berücksichtigt werden.

7.7.2 Art der Grundwasserzirkulation – ein Beispiel

Wichtige Parameter, die zur hydrogeologischen Charakterisierung geringdurchlässiger Gesteine relevant

Gesteinsart	Standort bzw. Gebiet	K-Wert [m/s]	Referenz
Untere Süsswassermolasse			
Mittel- und Grobsandstein (Typ «Rinnengürtel»)	Bohrung, Burgdorf (BE)	$4 \cdot 10^{-8}$ – $4 \cdot 10^{-6}$	AMMANN et al. 1993
Fein- bis Mittelsandstein (Typ «Durchbruchflächen»)	Grauholztunnel (BE)	$< 5 \cdot 10^{-10}$ – $5 \cdot 10^{-6}$	DOLLINGER 1997
Palfris-Formation (Untere Kreide)			
Mergelig-tonige Schiefer	Wellenberg (NW) oberflächennah	10^{-11} – 10^{-8}	NAGRA 1997
Mergelig-tonige Schiefer	Wellenberg (NW) > 300 m Tiefe	10^{-13} – 10^{-11}	NAGRA 1997
Opalinuston (Aalénien)			
Tonstein	Felslabor Mont Terri (JU)	2 – $9 \cdot 10^{-13}$	PEARSON et al. 2003
Lockergesteine in den Talsohlen			
Sandiger Kies (sehr ergiebiger Grundwasserleiter)	Grundwasserleiter der Aare zwischen Thun und Bern (BE)	$2 \cdot 10^{-3}$ – $2 \cdot 10^{-2}$	PASQUIER et al. 1999
Kies (z.T. siltig) und Sand (ergiebiger Grundwasserleiter)	«Oberer Grundwasserleiter» des Gürbetals (BE)	$3 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-3}$	PASQUIER et al. 1999

Tab. 7-2: Durchlässigkeit (K-Wert) von geringdurchlässigen, sedimentären Gesteinen anhand ausgewählter Beispiele (oben). Zum Vergleich sind K-Werte von zwei Lockergesteins-Grundwasserleitern aufgeführt (unten).

sind, stellen vor allem die Lithologie (Gesteinsart), die Durchlässigkeit (vgl. Tab. 7-2), die Porosität, die Porengeometrie, die Grundwasserbeschaffenheit, die Faktoren der Transportprozesse (z.B. Schwerkraft, Diffusion), die Herkunft und das Alter des Wassers dar. Die Figur 7-25 zeigt beispielhaft ein Profil des Chloridgehaltes in einer Abfolge von Tonformationen (Opalinuston und Lias-Mergel).

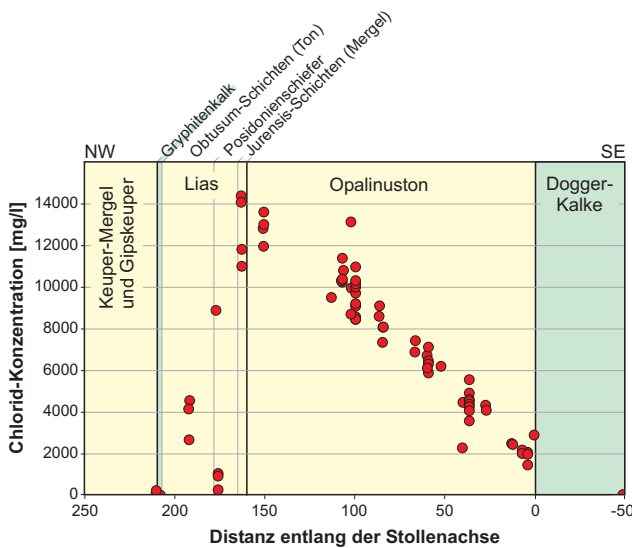


Fig. 7-25: Profil der Chlorid-Konzentration im Porenwasser des Opalinustons (nach PEARSON et al. 2003).

Die Proben wurden im Felslabor Mont Terri (JU) entnommen. Die Tonformationen liegen zwischen zwei wasserführenden, rund 45° nach Südosten einfallenden Kalkabfolgen: unten der Gryphitenkalk (links in Fig. 7-25), oben die Dogger-Kalke (rechts in Fig. 7-25). Der Chloridgehalt ist als «Fingerabdruck» des ursprünglichen Meerwassers aus der Zeit der Ablagerung der Sedimente, vor ca. 180 Millionen Jahren, zu interpretieren. Die höchste Konzentration erreicht mit rund 14'000 mg/l ungefähr zwei Drittel der Konzentration von Meerwasser. Die Abnahme des Chloridgehaltes gegen die untere bzw. obere Formationsgrenze ist durch diffusen Abtransport von NaCl vom Opalinuston in die benachbarten durchlässigeren Kalkabfolgen entstanden. Diese Abnahme der Salinität dürfte vor ca. 2,5 Millionen Jahren eingesetzt haben, als die Erosion der Jurakette eine Wasserinfiltration in die aufliegenden Dogger-Kalke ermöglicht hat (BOSSART & WERMEILLE 2003); die Salinitätsabnahme hat noch kein Gleichgewicht erreicht und schreitet immer noch voran. Die gegenwärtig beobachtete, langsame Wasserzirkulation

in den Tonformationen gegen das Felslabor (Stollen und Bohrungen) wird jedoch auf die Drainagewirkung des Stollensystems zurückgeführt. Eine Synthese über die hydrogeologischen Verhältnisse des Opalinustons am Standort Mont Terri ist in HEITZMANN (2004) präsentiert.

7.8 Grundwasser als Gefahrenpotential

Das Grundwasser kann auch ein Gefahrenpotential bilden. Die konsequente Messung der relevanten Parameter liefert die unentbehrliche Grundlage zur Planung geeigneter präventiver Massnahmen zur Verminderung der potentiellen Schäden.

7.8.1 Grundwasser und Überschwemmungen

Wie die katastrophalen Hochwasser von 1999 und 2000 in der Schweiz gezeigt haben, sind die jeweiligen Grundwasserverhältnisse vor und während der Hochwasserperiode oft entscheidend für die Intensität von Überschwemmungen. Je nach den örtlichen Verhältnissen kann der Anstieg der Grundwasseroberfläche für Überschwemmungen und Schäden verantwortlich sein. In Locarno löste der extrem hohe Seewasserstand vom 14.–15. Oktober 2000 einen Grundwasseranstieg aus; Heizöltanks wurden infolge des Auftriebs aus ihrer Verankerung gerissen und verursachten eine Verschmutzung (vgl. Fig. 7-26). Im Hinblick auf die Vermeidung einer solchen Situation sind bauliche Massnahmen (Sicherung der Tanks, Gebäudekonzipierung) möglich.

Durch eine Studie im Rhonetal (VS) wurde gezeigt, wie die von einem Grundwasseranstieg gefährdeten Zonen ausgeschieden werden können (FAGERLUND 2001). Bei



Fig. 7-26: Hochwassersituationsskizze Locarno, Oktober 2000 (nach DUPASQUIER & PARRIAUX 2002).

Bedarf können somit geeignete raumplanerische Massnahmen getroffen werden. Für diese Studie wurden ebenfalls die Daten aus dem hundertjährigen Hochwasser vom Oktober 2000 ausgewertet (vgl. Fig. 7-27). Die Analyse beruht auf dem dichten Messnetz zur Beobachtung des Grundwasserstandes im Rhonetal zwischen dem Genfersee und Visp (www.crealp.ch).



Fig. 7-27: Hochwasserereignis vom Oktober 2000 im Rhonetal: Ausschnitt aus der Karte der maximalen Amplitude des Grundwasserstandes, am 16.10.2000 (nach FAGERLUND 2001).

7.8.2 Grundwasser und Massenbewegungen

Grundwasser stellt einen der massgebenden Faktoren bei der Auslösung und dem Verlauf von Massenbewegungen – wie Rutschungen, Felsstürze, Hangmuren – dar. Das Grundwasser hat einen ungünstigen Einfluss auf die hydraulischen sowie fels- und bodenmechanischen Verhältnisse innerhalb der instabilen Masse. Bei der Rutschung von La Frasse (nordöstlich Aigle, VD) wurden die Verschiebungsbeträge einerseits mit dem Niederschlag, andererseits mit dem Grundwasserzufluss verglichen (NCG+EPFL 2004). Dabei wurde kein direkter Zusammenhang zwischen Verschiebungen und Niederschlägen beobachtet; diese Situation wird bei den meisten Rutschungen, die durch eine tiefere Gleitfläche gekennzeichnet sind, festgestellt. Hingegen besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den Verschiebungen und dem Grundwasserzufluss, der seitlich entlang der Ränder der Rutschmasse stattfindet (vgl. Fig. 7-28).

Die Rutschung liegt im Flysch, ist ca. 2 km lang und 500 bis 1000 m breit. Die ersten Verschiebungsmessungen wurden bereits Mitte des 19. Jahrhunderts im Zusammenhang mit dem Bau der Kantonsstrasse vorgenommen. Erste präventive Massnahmen durch Drainage wurden Anfang der 1920er Jahre durchgeführt.

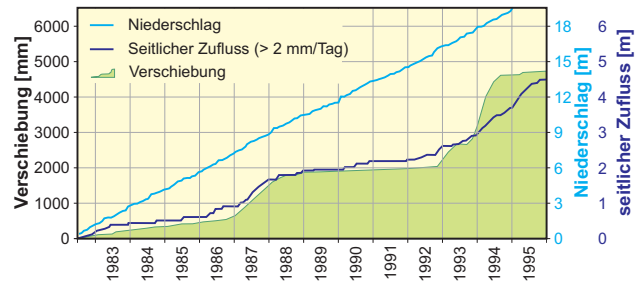


Fig. 7-28: Rutschung von La Frasse, Zusammenhang zwischen seitlichem Grundwasserzufluss und Verschiebungsbeträgen, kumuliert von Juli 1982 bis Dezember 1995. Die Übereinstimmung wurde verbessert, indem die niedrigen täglichen Zuflusswerte (< 2 mm/Tag) vor der Kumulierung ausgeklammert wurden (nach NCG+EPFL 2004).

Einen wichtigen Beitrag zur dauerhaften Sanierung der Rutschung kann eine Absenkung der Wasserdrücke leisten, da diese Drücke den massgebenden Faktor für die Gleitbewegungen der Rutschung bilden. Zu diesem Zweck wird ein Drainagesystem empfohlen mit einem ca. 1 km langen Drainagestollen unterhalb der Rutschfläche und vom Stollen her nach oben gerichteten Drainagebohrungen. Ein ähnliches System wurde in den Jahren 1993 bis 1996 zur Sanierung der Rutschung von Campo Vallemaggia (TI) ausgeführt (vgl. Fig. 7-29). Die bisherigen Kontrollmessungen deuten auf eine deutliche Wasserdruck-Absenkung und eine befriedigende Stabilisierung der Gleitmasse hin.

Die Rutschung von Campo Vallemaggia liegt in Kristallingesteinen (Metamorphiten) auf einer Fläche von mehr als 5 km² mit einer Mächtigkeit von bis zu 250 m und einem Gesamtvolumen von rund 800 Mio m³

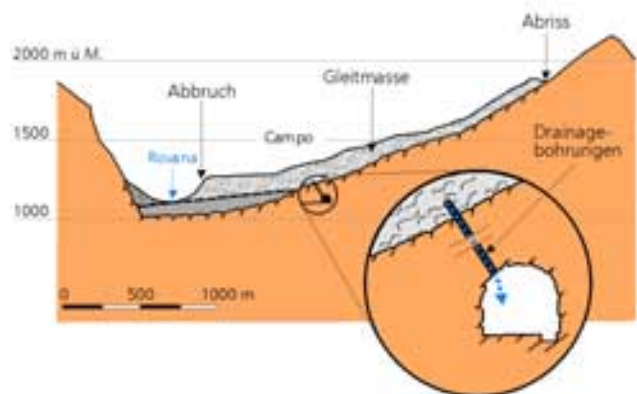


Fig. 7-29: Rutschung von Campo Vallemaggia, schematischer Längsschnitt mit Detail des Drainagesystems (nach LOMBARDI 1996).

(BONZANIGO 1998 und 1999, LOMBARDI 1996). Sie stellt eine der grossen Rutschungen Europas dar. Die ersten Bohrungen zur Untersuchung der Rutschung wurden im Jahre 1962 abgeteuft.

7.9 Grundwassernutzung

Das Grundwasser ist unser wichtigster Rohstoff. Der Trink- und Brauchwasserbedarf der Schweiz wird mehrheitlich aus dem Grundwasser gedeckt. Die Fassungsanlagen liefern ein Wasser guter Qualität, wovon der grösste Teil mit einer einfachen oder sogar ohne Behandlung zu den Verbrauchern gelangt. Das Grundwasser ist aber auch ein ausserordentlich guter Wärmelieferant für unterschiedliche Heizzwecke und bildet somit eine einheimische und umweltfreundliche Energiequelle.

7.9.1 Grundwasser für die Wasserversorgung

In der Schweiz fördern die rund 3000 öffentlichen Wasserversorgungen jährlich über 1000 Mio m³ Trinkwasser, wovon mehr als 80 % aus dem Grundwasser gedeckt werden. Im Jahre 2001 stammten 48 % aus Quellen und 36 % aus Förderbrunnen, 16 % waren aufbereitetes Seewasser (BFS 2002, SVGW 2004). In Gemeinden mit weniger als 10'000 Einwohnerinnen und Einwohnern, wo 54 % der Schweizer Bevölkerung leben, hängt die Trinkwasserversorgung sogar zu 98 % vom Grundwasser ab (MEYLAN 2003, SVGW 2002). Rund 46 % des Grundwassers aus Quellen und Förderbrunnen können ohne jegliche Aufbereitung oder Desinfektion an die Verbraucher abgegeben werden und 40 % benötigen lediglich eine einfache Aufberei-

tung (z.B. Behandlung mit Chlor, UV-Licht oder Ozon) (BUWAL 1993).

Das Grundwasser wird in speziell dafür geeigneten, den hydrogeologischen Verhältnissen am Fassungsstandort und dem Wasserbedarf angepassten Anlagen gefasst. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Förderbrunnen (Vertikal- und Horizontalfilterbrunnen) (vgl. Fig. 7-30), Quellfassungen (vgl. Fig. 7-31) (BUWAL 2004) und Anlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung für die Wasserversorgung (z.B. in Genf, Basel, Zürich, vgl. Abschnitt 7.11.2). Ein Horizontalfilterbrunnen besteht aus mehreren Filtersträngen, die von einem vertikalen Fassungsloch aus horizontal in den Grundwasserleiter gebohrt sind.

Etwa die Hälfte des genutzten Grundwassers kommt aus Förderbrunnen in den Talschotterebenen, die grösstenteils durch wichtige Flüsse – u.a. durch die grossen alpinen Flüsse – gespiesen werden. In den alpin beeinflussten Grundwasserleitern treten die Maxima des Grundwasserstandes meist im Frühling und Sommer auf, wobei die Schneeschmelze verstärkend wirkt. Somit findet dort eine genügende natürliche Grundwasseranreicherung im Prinzip auch bei anhaltender Trockenheit statt.

Hingegen kommt die andere Hälfte des genutzten Grundwassers aus Quellen; wenn diese durch oberflächennahes Grundwasser gespiesen werden, kann eine anhaltende Trockenheit zum ausgeprägten Rückgang der Quellschüttungen führen. Deshalb ist bei den Gemeinden, wo eine solche Situation regelmässig wiederkehren kann, ein Anschluss an grössere Wasserverbundnetze von Vorteil (BUWAL / BWG / MeteoSchweiz 2004).



Fig. 7-30: Blick in einen Förderbrunnen, Lockergesteins-Grundwasserleiter (Pumpwerk von Lenzburg in Niederlenz, AG).



Fig. 7-31: Stollen zur Quellfassung, Karst-Grundwasserleiter (Source de la galerie des Moyats, Quelle der Stadt La Chaux-de-Fonds, NE).

7.9.2 Grundwasser als Wärmelieferant

Unterhalb der Erdoberfläche ist natürliche Energie in Form von Wärme gespeichert. Im Schnitt nimmt die Temperatur ab Erdoberfläche pro 100 m Tiefe um etwa 3 °C zu. Diese Energie (geothermische Energie, auch als Erdwärme bezeichnet) ist u.a. im Grundwasser gespeichert und kann für unterschiedliche Heizzwecke genutzt werden. Drei Nutzungsmethoden können unterschieden werden (BFE 1998), wobei unterirdische Wärmetauscher, bei denen kein Grundwasser gefördert wird (z.B. Erdwärmesonden, die zum Teil auch bis ins Grundwasser reichen), ausgeklammert sind.

Die erste Methode bildet die Wärmenutzung der «untiefen» (d.h. Tiefe von max. 400 m) Grundwasservorkommen (BURGER et al. 1985). Grundwassertemperaturen betragen in der Schweiz im oberflächennahen Bereich (5 bis 20 m) im Mittel 8 bis 12 °C und unterliegen nur sehr geringen jahreszeitlichen Schwankungen. Bei dieser Methode wird durch einen Förderbrunnen Grundwasser entnommen und dessen Wärme von einer Wärmepumpe entzogen (vgl. Fig. 7-33). Allein im Kanton Bern z.B. sind mehr als 900 solcher Anlagen mit einer thermischen Leistung von insgesamt über 50 MW in Betrieb (SVG 2002b).

Die zweite Methode entspricht der Nutzung von Subthermal- bzw. Thermalquellen (Temperatur von 15 bis 20 °C bzw. > 20 °C) oder von tiefen Grundwasservorkommen mittels Bohrungen (Singletten- oder Doubletten-Anlagen). In der Schweiz fördern sechs Tiefbohrungen (Tiefe ca. 550 bis 1550 m, Auslauftemperatur 23 bis 69 °C) mit einer thermischen Leistung von insgesamt über 10 MW warmes Grundwasser für Heiz-

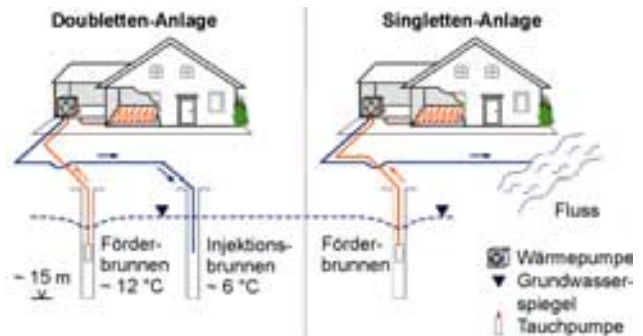


Fig. 7-33: Beheizung eines Einfamilienhauses mit der Wärme von Grundwasser (nach SVG 2002b).

zwecke, wie z.B. die geothermische Heizanlage in Riehen (BS) oder Thermalbäder. Dreizehn Thermalzentren nutzen warmes Grundwasser mittels Quell- und Brunnenfassungen oder Tiefbohrungen (BFE 1998, SVG 2003, VUATAZ & FEHR 2000) (s. Fig. 7-32, Fig. 7-34).

Die dritte Methode bildet die Nutzung von warmen Tunnelwässern. Das gesamte geothermische Potential von fünfzehn untersuchten Tunnels beläuft sich auf gegen 30 MW, was dem Wärmebedarf von etwa 4000 Haushalten entspricht; davon sind fünf Strassen- und Eisenbahntunnels bereits an eine geothermische Heizanlage gekoppelt – z.B. die Tunnels von Ricken (SG), von Mapo-Moretina (TI) und der Furka (VS) (SVG 2002a).



Fig. 7-32: Pumpversuch in der Tiefbohrung von Lavey-les-Bains (VD). Die Austrittstemperatur des Wassers beträgt 68 °C.



Fig. 7-34: Thermalquelle im Bäderpark von Val d'Illeiez (VS). Die Austrittstemperatur des Wassers beträgt maximal 30 °C.

7.10 Grundwasserschutz

Der Trink- und Brauchwasserbedarf der Schweiz wird zu mehr als 80 % durch die Grundwasservorkommen aus durchlässigen Locker- und Festgesteinen gedeckt. Grundwasser ist aber auch ein wesentlicher Bestandteil des natürlichen Wasserkreislaufes und vieler Ökosysteme. Die in den 1990er Jahren revidierte Gewässerschutzgesetzgebung bezweckt unter anderem den quantitativen und qualitativen Schutz des Grundwassers vor nachteiligen Einwirkungen und soll dessen nachhaltige Nutzung unter Berücksichtigung ökologischer Ziele ermöglichen.

7.10.1 Grundwassergefährdung

Die Beschaffenheit des Grundwassers hängt unter natürlichen Bedingungen wesentlich vom durchflossenen geologischen Substrat ab (DEMATTEIS et al. 1997). Gewisse für die Wasserversorgung unerwünschte Eigenschaften wie z.B. eine hohe Mineralisation oder ein niedriger Sauerstoffgehalt (BITTERLI et al. 2004) können die Folge von besonderen lokalen geologischen Verhältnissen sein. Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit wird aber auch durch menschliche Aktivitäten verändert oder ist zumindest dadurch gefährdet. Beispiele sind die Auswaschung von Nährstoffen (z.B. Nitrat) und Pflanzenschutzmitteln (z.B. Herbizide) aus landwirtschaftlichen Nutzflächen, Gärten und Sportanlagen, die mikrobiellen Belastungen als Folge von falsch ausgebrachter Gülle, der Sickerverluste aus undichten Abwasserkanalisationen und Güllegruben oder die Gefährdung durch Tankanlagen (BUWAL 2004). In Figur 7-35 sind die verschiedenen Arten von Verschmutzungsquellen aufgeführt. In mengenmässiger Hinsicht besteht auch eine Gefährdung durch gewisse unerwünschte Eingriffe wie z.B. durch Bauwerke unterhalb des Grundwasserspiegels (drainierende Wirkung oder Verringerung des Grundwasserdurchflussprofils) oder durch eine intensive Überbauung (Bodenversiegelung).

7.10.2 Grundsätze des Grundwasserschutzes

Angesichts möglicher negativer Umwelteinflüsse ist der Grundwasserschutz gemäss Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 einerseits flächendeckend umzusetzen. Andererseits ist aber durch den speziellen (nutzungsorientierten) Schutz für das genutzte und zur Nutzung vorgesehene Grundwasser jederzeit und dauerhaft eine einwandfreie Trinkwasserversorgung sicherzustellen (vgl. Fig. 7-36) (BUWAL 2004).

Herkunft der Verschmutzung	Diffuses räumliches Auftreten	Punktueller räumliches Auftreten
Landwirtschaft, Gartenbau	Ausbringen von Düngemitteln und Pestiziden	Undichte Jauchegruben Leerung von Jauchegruben, nicht vorschriftsgemässe Entsorgung gefährlicher Stoffe
Wohngemeinden	Diffuse Verluste aus defekten Abwasserleitungen	Verluste aus Heizöltanks Überlaufen von Heizöltanks
Industrie, Gewerbe	Kontinuierliche Verluste schädlicher Substanzen in grossen Industriegebieten	Ungesicherte Lagerung schädlicher Stoffe Ereignishaft Freisetzung schädlicher Stoffe, nicht vorschriftsgemässe Entsorgung gefährlicher Stoffe
Verkehrswege	Salzeinsatz im Winter, Abfließen von Öl und Metallverbindungen, Verdunstung von Treibstoffbestandteilen, Unkrautbekämpfung an Eisenbahnlinien	Strassen- und Bahnunfälle
Belastete Standorte		Ehemalige Industrie- und Deponiestandorte, Schiessplätze, Unfallorte

Fig. 7-35: Auftreten von kontinuierlichen (gelb) und ereignishaften (orange) Schadenereignissen (nach DUPASQUIER & PARRIAUX 2002).

flächendeckend	Naturnahe Grundwasserqualität und Biozönose sicherstellen	Naturnahe hydraulische Verhältnisse im Grundwasserleiter erhalten
	Trinkwasserqualität gewährleisten	Ausreichendes Trinkwasserangebot sichern
nutzungsorientiert	qualitativ	quantitativ

Fig. 7-36: Ziele des Gewässerschutzes (BUWAL 2004).

Die hauptsächlichen Instrumente, um den qualitativen Gefährdungen des Grundwassers zu begegnen, sind:

- numerische Grundwasser-Qualitätsanforderungen; die Überschreitung dieser physikalisch-chemischen Indikatorwerte weist in der Regel auf eine mögliche anthropogen bedingte Belastung und auf einen Handlungsbedarf (Abklärung oder Massnahme) hin;

- Gewässerschutzbereiche, Grundwasserschutzzonen und -areale (Instrumente des planerischen Schutzes des Grundwassers, s. Abschnitt 7.10.3);
- technische, bauliche und organisatorische Massnahmen, beispielsweise bei der Lagerung, dem Transport und dem Gebrauch wassergefährdender Stoffe (DUPASQUIER & PARRIAUX 2002) sowie bei der Durchführung von Bauarbeiten bzw. beim Materialabbau in Gewässerschutzbereichen und Grundwasserschutzzonen.

Im Hinblick auf den Schutz des Grundwassers vor quantitativen Gefährdungen sind Massnahmen u.a. in den folgenden Bereichen festgelegt:

- Grundwassernutzung und -bewirtschaftung (z.B. Vorbeugung der Übernutzung);
- Bauarbeiten, die Grundwasser beeinflussen können (z.B. Auflagen bei Untertagebauten und Stauanlagen).

Die weiter oben aufgeführte Strategie beruht grundsätzlich auf der Prävention – für alle Typen von Grundwasserleitern, im Lockergestein und in verkarsteten oder geklüfteten Festgesteinen – und soll einen nachhaltigen Grundwasserschutz gewährleisten.

7.10.3 Planerischer Schutz

Bei den Massnahmen der Raumplanung werden vor allem die folgenden Elemente definiert (vgl. Fig. 7-37 und Fig. 7-39; BUWAL 2004):

- Der Gewässerschutzbereich A_u umfasst die bedeutenden Grundwasservorkommen.
- Mit dem Gewässerschutzbereich A_o können oberirdische Gewässer mit besonderer Nutzung geschützt werden.
- Der Zuströmbereich Z_u dient zum Schutz vor schwer abbaubaren Substanzen (gezielter Schutz der Wasserqualität).
- Die Grundwasserschutzzonen S1, S2 und S3 dienen dazu, die Fassungsanlage und das Grundwasser unmittelbar vor seiner Nutzung als Trinkwasser zu schützen.
- Die Grundwasserschutzareale sichern den vorsorglichen Schutz dort, wo eine zukünftige Grundwassernutzung vorgesehen ist.

Zu jedem Element des planerischen Schutzes – Bereich, Zone oder Areal – gehört eine dem Schutzbedarf entsprechende Liste von Schutzmassnahmen bzw. Nutzungsbeschränkungen.

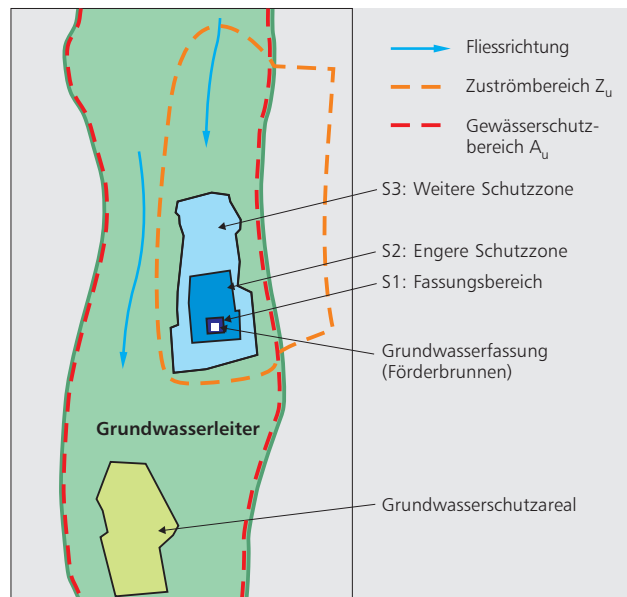


Fig. 7-37: Planerische Instrumente des Grundwasserschutzes (nach DUPASQUIER & PARRIAUX 2002).

Bei Lockergesteins-Grundwasserleitern werden die Schutzzonen S konzentrisch um die Fassung ausgeschieden, wobei das Kriterium für die Bemessung der Zone S2 der Verweilzeit des Grundwassers entspricht: die Verweilzeit vom äusseren Rand der Zone S2 bis zur Grundwasserfassung soll mindestens 10 Tage betragen. Für die Bemessung der Schutzzonen S in Karst- und Kluft-Grundwasserleitern ist die Vulnerabilität (Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers, s. EUROPEAN COMMISSION 1995, ZWAHLEN 2004) im Einzugsgebiet der Grundwasserfassung gemäss GSchV massgebend. Entsprechende Bemessungskriterien sind in neuen Praxishilfen ausgeführt (DOERFLIGER & ZWAHLEN 1998, POCHON & ZWAHLEN 2003); diese hydrogeologisch fundierten, nachvollziehbaren Kriterien sollen einen gesamtschweizerisch harmonisierten, nachhaltigen Grundwasserschutz ermöglichen. Bei stark heterogenen Grundwasserleitern (in Karst- und in gewissen Kluft-Grundwasserleitern) nimmt der Schutzbedarf nicht mit dem Abstand zur Fassung regelmässig ab, so dass die Schutzzonen nicht mehr konzentrisch gestaltet sind (vgl. Fig. 7-38).

Die Kantone erstellen Gewässerschutzkarten, in der Regel im Massstab 1:25'000, die eine Übersicht über die Elemente des planerischen Schutzes – Bereiche, Zonen oder Areale – sowie über die Fassungsanlagen (Förderbrunnen, gefasste Quellen) darstellen (vgl. Fig. 7-39). Eine gesamtschweizerische, digitale

Gewässerschutzkarte wurde in einem Geographischen Informationssystem (GIS) erstellt und ist für das interessierte Publikum teilweise via Internet zugänglich (Übersichtskarte der Grundwasserschutzzonen sowie der Gewässerschutzbereiche, www.ecogis.admin.ch bzw. www.umwelt-schweiz.ch).

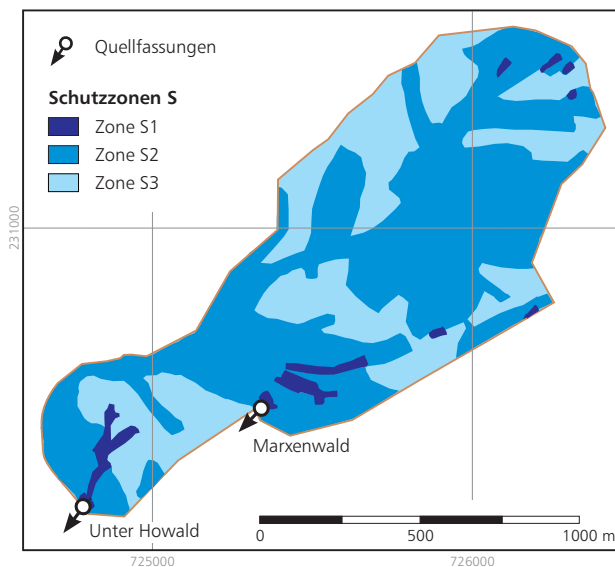


Fig. 7-38: Bemessungsvorschlag der Schutz-zonen für zwei gefasste Quellen in Rieden (SG). Grundwasserleiter: Nagelfluh, Sandstein und Mergel der Subalpinen Molasse (nach POCHON & ZWAHLEN 2003).

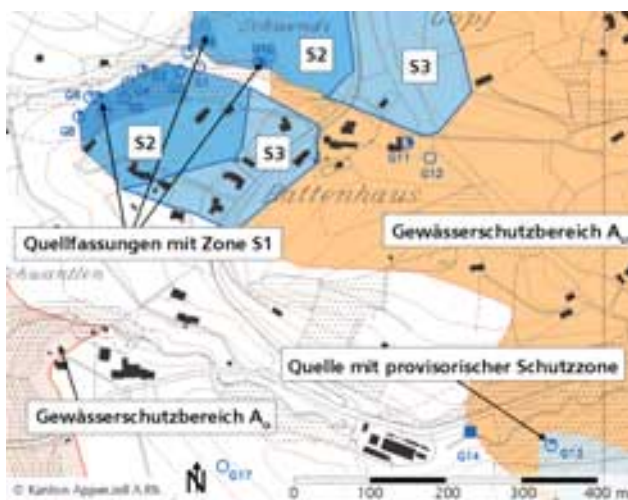


Fig. 7-39: Ausschnitt aus der Gewässerschutzkarte des Kantons Appenzell A.Rh. 1:10'000 (Beschriftung ergänzt).

7.11 Grundwasser und Wald

Die Ergebnisse der Beobachtung der Grundwasserqualität sowie die Statistik der Grundwasserschutzzonen unterstreichen die grosse Bedeutung der bewaldeten Einzugsgebiete für die Trinkwasserversorgung. Der Wald sorgt für sauberes Trinkwasser. Eine nachhaltige Bewirtschaftung der Waldgebiete als Trinkwasserlieferanten bedingt jedoch nicht nur eine sorgfältige Umsetzung der Gewässerschutzgesetzgebung sondern auch eine effiziente Luftreinhaltung und eine angemessene Waldbewirtschaftung.

7.11.1 Wenig Fremdstoffe und optimale Reinigungsprozesse im Wald

Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Nutzflächen gibt es in Waldgebieten praktisch keinen direkten Eintrag von umweltgefährdenden Stoffen in den Boden. Der Einsatz von Düngemitteln wie Mineraldünger, Gülle, Mist oder Kompost ist dort nicht erforderlich und zudem stark eingeschränkt bzw. verboten. Anders als in Siedlungsgebieten führen auch kaum Kanalisationsrohre durch den Wald, aus denen Fäkalbakterien und unerwünschte Stoffe ins Grundwasser austreten könnten. Zudem besteht hier ein weit geringeres Verschmutzungsrisiko durch Unfälle und den fahrlässigen Umgang mit wassergefährdenden Substanzen wie Brenn- und Treibstoffen oder Chemikalien. Aufgrund der eingeschränkten wirtschaftlichen Aktivitäten sind Quellen und Förderbrunnen im Wald insgesamt einer viel geringeren Gefährdung durch Schadstoffe ausgesetzt als Grundwasserfassungen in Landwirtschaftszonen oder in Siedlungsgebieten (vgl. Fig. 7-12). Zudem garantieren der hohe Humusgehalt vieler Waldböden, die damit verbundene Vielfalt an Bodenorganismen sowie die gute Durchwurzelung fast überall im Wald eine zuverlässige Filterfunktion. Auch mit seinem speziellen Mikroklima schafft der Wald Bedingungen, die für den biologischen Reinigungsprozess im Boden optimal sind. So werden die mineralischen und organischen Stoffe, die nicht ins Trinkwasser gehören, weitgehend ausgefiltert oder abgebaut (IVB ohne Datum, MEYLAN 2003, SCHÜRCH et al. 2003a).

7.11.2 Der Wald als Trinkwasserlieferant

Aufgrund der Vorteile, die der Wald als Trinkwasserlieferant bietet, befinden sich viele Grundwasserfassungen (Quellen oder Förderbrunnen) in bewaldeten Gebieten (vgl. Fig. 7-40). In der Schweiz befinden sich rund 42 % aller Grundwasserschutzzonen in geschlossenen Wäldern. Dieser Wert liegt deutlich über dem



Fig. 7-40: NAQUA-Messstation an einer öffentlichen Quelfassung, deren Einzugsgebiet im Wald liegt (Freienstein-Teufen, ZH).

Anteil des Waldareals an der Landesfläche von ca. 27 % (MEYLAN 2003).

Grosse Anlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung für die Trinkwasserversorgung nutzen nach Möglichkeit bewaldete Bodenareale zur Versickerung des Wassers. Beim Grundwasserwerk Lange Erlen (BS) z.B. wird Rheinwasser in vierzehn bewaldeten Bodenarealen mit einer Gesamtfläche von ca. 22 ha zur Versickerung und zur künstlichen Anreicherung des Grundwassers gebracht (IWB ohne Datum). Die Sickeranlagen und die Förderbrunnen des Grundwasseranrei-

cherungssystems der Stadt Basel in der Hard bei Muttenz (BL) liegen in einem Wald von 240 ha (vgl. Fig. 7-41) wo eine reiche Artenmischung erhalten wird (HARDWASSER AG ohne Datum). An den beiden erwähnten Standorten besitzt das geförderte Grundwasser beste Trinkwasserqualität.

7.11.3 Lufts Schadstoffe und Nitratbelastung: potentielle Gefahren und Lösungen

Die Vorzüge des Waldes als Trinkwasserlieferant werden aber zunehmend durch den übermässigen Eintrag von Lufts Schadstoffen und eine allmähliche Versauerung bedroht. Eine häufig zu hohe Stickstoffkonzentration in den Wäldern stammt mehrheitlich aus der Landwirtschaft, aber auch aus Verkehr und Feuerungen. Durch die Filterwirkung der hohen Baumkronen, in denen neben Staubpartikeln auch gasförmige Lufts Schadstoffe hängen bleiben, werden die Wälder viel stärker belastet als alle anderen Landschaftsformen – wobei die Laubbäume generell günstigere Eigenschaften als die Nadelbäume aufweisen. Zudem führt die hohe Verdunstungsrate im Wald dazu, dass der Anteil des Regenwassers, der den Waldboden erreicht, eine erhöhte Konzentration an gelösten Stoffen aufweist. Übermässige Stickstoffeinträge ihrerseits führen zu höheren Nitratauswaschungen; damit wächst das Risiko einer zunehmenden Nitratbelastung des Grundwassers – auch aus Waldeinzugsgebieten.



Fig. 7-41: Sickerkanal der Grundwasser-Anreicherungsanlage in der Hard (BL).

Obwohl zum Schutz des Grundwassers primär bei den Emissionsquellen von Stickstoffverbindungen angesetzt werden muss (u.a. Luftreinhaltung), kann mit einer speziell auf den Grundwasserschutz ausgerichteten Waldbewirtschaftung ein wichtiger Beitrag geleistet werden, um die Belastung des Sickerwassers mit Nitrat und anderen unerwünschten Fremdstoffen zu verringern. Besonders relevant sind in diesem Zusammenhang die Wahl der Baumarten, Verjüngerungsmassnahmen, Aufforstungen sowie ein angemessener Umgang mit grossflächigen Rodungen im Einzugsgebiet von Trinkwasserfassungen (COMBE & ROSSELLI 2002, MEYLAN 2003). Die Aufrechterhaltung des Waldes als Lieferant von sauberem Trinkwasser setzt eine vermehrt interdisziplinäre Betrachtung des Systems Wald-Boden-Grundwasserleiter bei der Untersuchung des Wasserkreislaufs im Wald sowie die Gewährleistung der systematischen, langfristigen Beobachtung der Grundwasserqualität voraus (vgl. Fig. 7-12 und Fig. 7-42). Diese gewährleistet das nationale Messnetz zur Beobachtung der Grundwasserqualität (NAQUA) (vgl. Kap. 7.4).



Fig. 7-42: Lutry-Quelle in Savigny (NISOT-Messnetz): Beobachtung der Isotope im Wasserkreislauf.

7.12 Hydrogeologische Karten

Eine hydrogeologische Karte gibt Auskunft über die Grundwasserverhältnisse; somit sind dabei Angaben einerseits über die Grundwasserleiter und andererseits über das eigentliche Grundwasser dargestellt. Inhalt und Massstab der Karte hängen grundsätzlich von der Zielsetzung und von den potentiellen Nutzern ab.

7.12.1 Die Darstellung von hydrogeologischen Daten

Eine hydrogeologische Karte gibt Auskunft über das Vorkommen und die Art der Zirkulation des Grundwassers (z.B. Poren-, Kluft- oder Karstgrundwasser), die Eigenschaften der Grundwasserleiter (vor allem Durchlässigkeit) sowie die Lage der Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete (vgl. Fig. 7-1) und der wichtigeren Quellen. Die Karte stellt eine Synthese der vorhandenen hydrogeologischen Daten dar (IAH 1989). Eine unerlässliche Grundlage dazu bildet die geologische Karte. Eine hydrogeologische Karte kann durch Profile ergänzt werden, um Auskunft über die Verhältnisse in drei Dimensionen zu geben; Beispiele von gross- und kleinstmässigen hydrogeologischen Profilen sind in BUTTET et al. (1992) und BOUZELBOUDJEN et al. (1997) ersichtlich.

Im erweiterten Sinne kann auch die Darstellung von ausgewählten hydrogeologischen Daten als hydrogeologische Karte bezeichnet werden. Als Beispiel können folgende Karten erwähnt werden: Karte mit Lage und Form der Grundwasseroberfläche; Situationskarte der Quellen, Piezometer und Förderbrunnen; Karte der Markierversuche mit Angabe der unterirdischen Wasserläufe; Karte der Verbreitung und der Konzentration eines bestimmten gelösten Stoffes im Grundwasser (Grundwasserhärte-, Nitrat-, Kohlenwasserstoff-Karte).

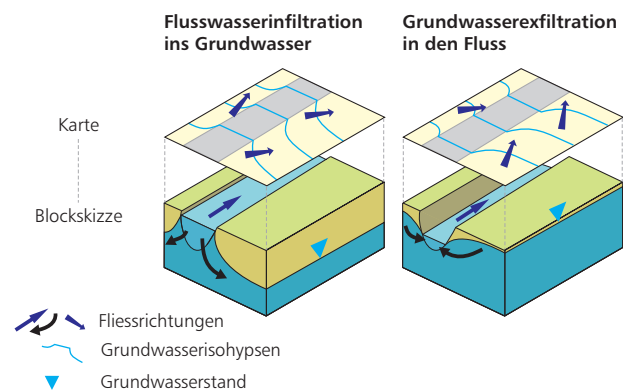


Fig. 7-43: Erläuterungsskizze Grundwasseroberfläche (nach SCHÜRCH et al. 2004).

Die Auswertung der Grundwasserstandsmessungen durch Interpolation und Extrapolation, unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse, ermöglicht die Ermittlung der Grundwasseroberfläche (vgl. Fig. 7-43). Diese wird in einer Karte mittels Grundwas-

serisohypsen (oder Grundwassergleichen) dargestellt, d.h. als Kurven gleicher und gleichzeitiger Höhe der Grundwasserstände, bezogen auf eine waagrechte Ebene. Aus diesen Isohypsen können die Fliessrichtungen abgeleitet werden; die Fliessrichtung des Grundwassers ist meistens senkrecht zu den Isohypsen. Wenn ein Grundwasserleiter im Zusammenhang mit einem Fluss steht, können anhand der Grundwasserisohypsen und -fliessrichtungen die Strecken mit Grundwasserexfiltration in den Fluss bzw. mit Flusswasserinfiltration ins Grundwasser ermittelt werden.

7.12.2 Hydrogeologische Karten in der Schweiz

Eine Übersicht über die in der Schweiz veröffentlichten hydrogeologischen Karten ist in BUTTET et al. (1992) dargestellt. Diese Karten werden je nach Zielsetzung in unterschiedlichen Massstäben erstellt.

Kleinmassstäbliche Karten (1:500'000 oder kleiner) vermitteln eine landesweite Übersicht und richten sich an Fachleute aus Planung, Verwaltung und Hochschulen sowie auch an fachfremde interessierte Kreise. Sie werden von Fachdiensten des Bundes (siehe Abschnitt 7.12.3) oder von Forschungsorganisationen (JÄCKLI & KEMPF 1967) erstellt. Die Hydrogeologische Übersichtskarte der Schweiz 1:2'200'000, veröffentlicht z.B. in DUPASQUIER & PARRIAUX (2002), ist verkleinert und vereinfacht in Fig. 7-6 ersichtlich.

Mittelmassstäbliche Karten (1:100'000) vermitteln eine Übersicht über ein Teilgebiet der Schweiz. Sie stellen auch den allgemeinen Rahmen für kantonale Planungsaufgaben dar. Das Zielpublikum ist ähnlich wie dasjenige der kleinmassstäblichen Karten. Zur Zeit sind sechs Blätter der Hydrogeologischen Karte der Schweiz 1:100'000 erschienen (SGTK ab 1972; vgl. Fig. 7-45, HAERING et al. 1993); eine weitere ist in Vorbereitung. Für den Kanton Bern ist eine hydrogeologische Karte in zwei Blättern im Massstab 1:100'000 vorhanden (WEA 1998, 1999).

Grossmassstäbliche Karten (1:25'000, in einzelnen Fällen 1:50'000) stellen Planungs- und Vollzugsinstrumente dar. Sie werden von den Kantonen unter Berücksichtigung der lokalen Bedürfnisse erstellt. Sie stellen ein Instrument für die Erschliessung, die Bewirtschaftung und den Schutz des Grundwassers dar. In verschiedenen Kantonen beschränkt sich die Darstellung auf die hydrogeologischen Verhältnisse der Lockergesteins-Grundwasserleiter; diese Karten werden oft als «Grundwasserkarten» bezeichnet. Sie zeigen unter anderem die Verbreitung und Mächtigkeit der

Grundwasservorkommen, die Grundwasseroberfläche und -fliessrichtung (Fig. 7-44). Die ebenfalls von den Kantonen erstellten Gewässerschutzkarten werden unter 7.10 «Grundwasserschutz» erwähnt.

Hydrogeologische Detailkarten (Massstab grösser als 1:25'000) werden vor allem gezielt für konkrete Wasserversorgungs- oder Infrastrukturprojekte erstellt und in der Regel nicht veröffentlicht.

7.12.3 Digitale Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500'000

Im Zusammenhang mit der Neubearbeitung der Geologischen und Tektonischen Karte der Schweiz 1:500'000 in einem Geographischen Informationssystem (GIS) (BWG in Vorb. a und b, HEITZMANN & PHILIPP 1999) drängte sich auch eine Weiterentwicklung der bestehenden Hydrogeologischen Karte (JÄCKLI & KEMPF 1967) auf. Die neue Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500'000 teilt sich auf in ein erstes Blatt, welches die verschiedenen Grundwasservorkommen der Schweiz und deren Ergiebigkeit darstellt (Blatt «Grundwasservorkommen») und in ein zweites Blatt («Vulnerabilität der Grundwasservorkommen»), in welchem die Grundwasservorkommen aufgrund ihrer Vulnerabilität (Verschmutzungsempfindlichkeit) charakterisiert werden. Im Blatt Grundwasservorkommen (Fig. 7-46), das sowohl im Hydrologischen Atlas der Schweiz (Tafel 8.6, BITTERLI et al. 2004) wie auch in der Kartenreihe des BWG im Massstab 1:500'000 (BWG in Vorb. c) veröffentlicht wird, werden zudem die Art der Grundwasserzirkulation in Karst-, Kluft- oder Lockergesteinen, die wichtigsten Quell- und Grundwasserfassungen sowie hydrodynamische Angaben zu den Infiltrations- und Exfiltrationsgebieten dargestellt. Im Blatt Vulnerabilität sollen die natürlichen Kriterien wie Bodenart, Deckschicht und ungesättigte Zone quantitativ beurteilt und kombiniert sowie das Resultat dieser Kombination als Karte dargestellt werden. Die beiden hydrogeologischen Karten, zusammen mit der Geologischen und Tektonischen Karte der Schweiz, beruhen auf der gleichen Datenbasis und stellen ein gemeinsames Geographisches Informationssystem dar. Es ist vorgesehen, dass diese Karten den interessierten Benutzern sowohl als gedrucktes Produkt wie auch in digitaler Form zur Verfügung gestellt werden.

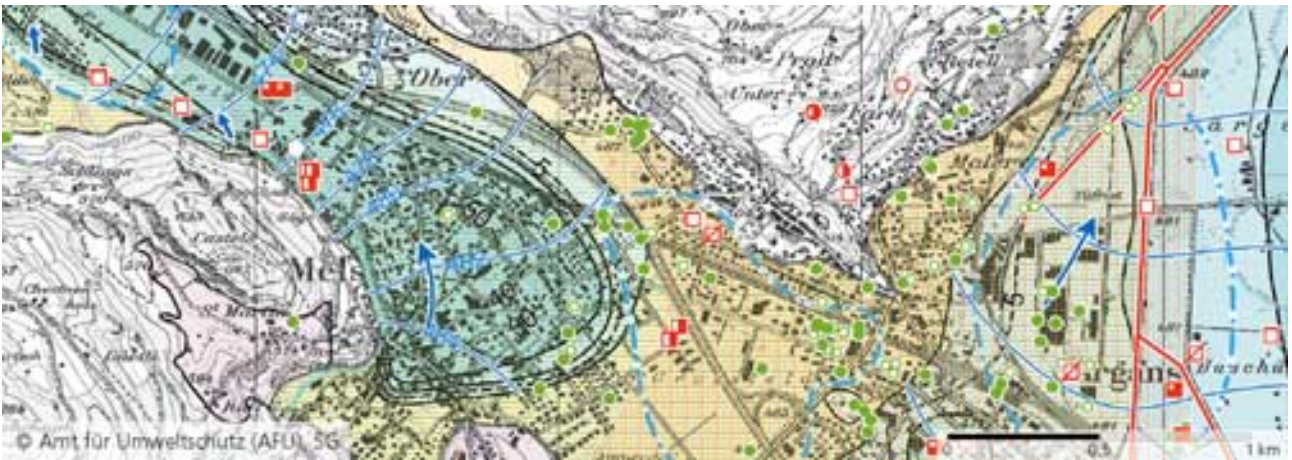


Fig. 7-44: Ausschnitt aus der Grundwasserkarte des Kantons St. Gallen 1:25'000.



Fig. 7-45: Ausschnitt aus der Hydrogeologischen Karte der Schweiz 1:100'000, Blatt Toggenburg (HAERING et al. 1993).

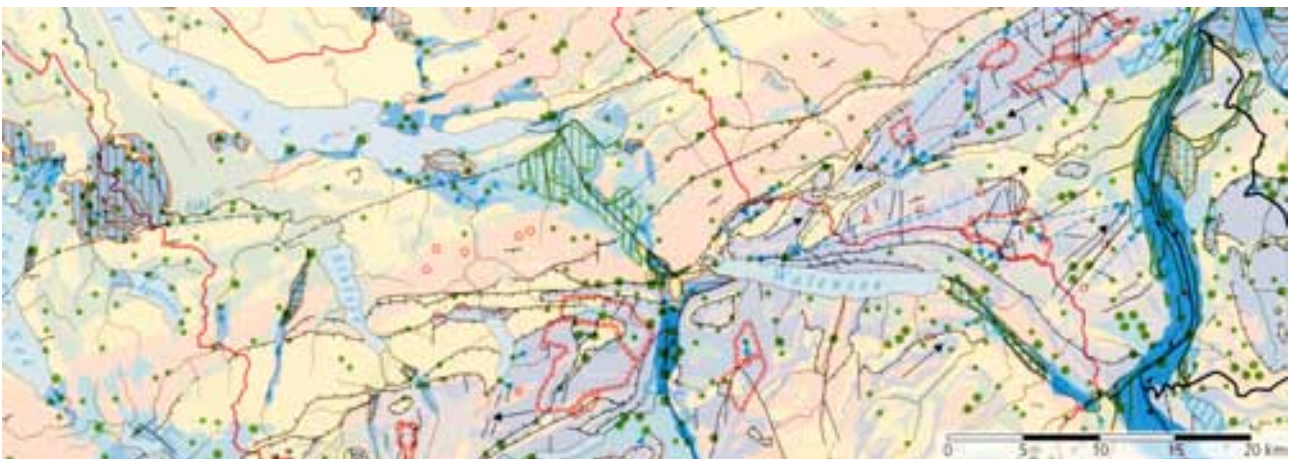


Fig. 7-46: Ausschnitt aus der Hydrogeologischen Karte der Schweiz 1:500'000 (BITTERLI et al. 2004).