

TIEFENGRUNDWASSER

VORKOMMEN, NUTZUNGSPOTENZIAL UND SCHUTZWÜRDIGKEIT

Tiefengrundwasser findet sich in allen grosstrukturellen Einheiten der Schweiz. Die bekannten, teilweise genutzten Vorkommen von Tiefengrundwasser und insbesondere die chemische Zusammensetzung dieser Wässer werden für die verschiedenen Einheiten aufgezeigt. Im Hinblick auf mögliche Nutzungskonflikte werden die gesetzlichen Grundlagen und Massnahmen zum Schutz dieser Ressource diskutiert.

H. Niklaus Waber, Universität Bern; Pius Bissig, Dr. Bernasconi AG*

Peter Huggenberger, Universität Basel; Benjamin Meylan, Grundwasserschutz & Grundwassernutzung

Ellen Milnes, Université de Neuchâtel; Marc Schürch, Bundesamt für Umwelt BAFU

Ulrike Walter, Dr. Heinrich Jäckli AG

RÉSUMÉ

EAUX SOUTERRAINES PROFONDES – PRÉSENCE, POTENTIEL D'UTILISATION ET PROTECTION

L'eau souterraine profonde est une ressource essentielle qui comprend les ressources en eau souterraine profonde actuellement utilisées ainsi que celles qui seront potentiellement utilisables à l'avenir. Un examen des données existantes sur la présence d'eau souterraine profonde montre que a) les eaux souterraines profondes dans le sous-sol géologique de la Suisse sont pour la plupart faiblement minéralisées (<2,5 g/l), b) présentent une qualité d'eau potable à certains endroits en termes de minéralisation, c) sont détectées à des profondeurs allant jusqu'à < 2,5 km, d) sont déjà utilisées aujourd'hui dans certaines communes ou y ont un potentiel d'utilisation et e) l'exfiltration de l'eau souterraine profonde dans les eaux de surface et la présence d'eau souterraine (utilisée) près de la surface sont connues dans de nombreux endroits.

Des connaissances suffisantes de la présence, de l'expansion et de la fertilité des eaux souterraines profondes font souvent défaut; ainsi il est urgent d'assurer par précaution la protection des eaux souterraines profondes. En effet, même les eaux souterraines profondes peuvent être contaminées et contribuer à la pollution des eaux peu profondes. Lors de la planification des utilisations du sous-sol profond, la présence connue d'eaux souterraines profondes est

EINLEITUNG

Wasser ist neben Gestein der zweite Hauptbestandteil des geologischen Untergrundes. Unterhalb der ungesättigten Zone tritt es im Porenraum auf und füllt diesen mit wenigen Ausnahmen vollständig. Die Wasserwegsamkeiten und die Fließraten im Untergrund werden durch die Ausbildung des Gesteins, das Vorhandensein von tektonischen Strukturen, die Topografie und die Infiltration bestimmt. Reaktionen mit den durchflossenen, mineralogisch unterschiedlichen Gesteinen und mögliche Mischungen verschiedener Wassertypen entlang der Fließwege führen zur Mineralisation des Wassers.

Als Grundwasservorkommen werden gemeinhin jene Wasservolumen im Untergrund bezeichnet, die mit geringem Aufwand für die Wasserversorgung genutzt werden oder werden könnten. Solche Vorkommen sind vorwiegend im oberflächennahen Untergrund (Dekameterbereich) vorhanden [z.B. 1]. Unter den in Karst- und Kristallingebieten anzutreffenden hydrogeologischen Situationen (z.B. im Jura und Alpenraum) können sie bis in wenige Hundert Meter Tiefe reichen. Es handelt sich dabei um meteorisches Wasser mit einer vollständigen Erneuerung innerhalb von Jahren bis wenigen Jahrzehnten.

* Kontakt: waber@geo.unibe.ch

Seit Jahrhunderten werden auch natürliche Aufstösse (Quellen) von warmem und/oder mineralreichem Wasser genutzt und durch Brunnen und Bohrungen in grösserer Tiefe erschlossen. Aufgrund erhöhter Temperatur und/oder Mineralisation wurde solchen Wässern eine Herkunft aus grösserer Tiefe zugeschrieben [2, 3, 4]. So schreibt Högl [4] z. B. in seinen Schlussfolgerungen «ein Mineralwasser lässt sich durch dessen Herkunft aus tieferen Bereichen der Erdkruste erklären und das frei ausfliessende oder erbohrte Mineralwasser sollte grundsätzlich ein zutage tretendes Tiefenwasser sein».

In den letzten 60 Jahren wurde im Rahmen von Tiefbohrungen und tief liegenden Tunnelbauten den tief unter der Oberfläche vorkommenden Grundwasservorkommen vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt [z. B. 5-16]. Dabei bürgerte sich der Begriff «Tiefengrundwasser» ein, ohne dass dieser speziell definiert worden wäre. Dieser Begriff wurde allgemein für Grundwässer verwendet, die entweder mit konventionellen Mitteln (d. h. durch Pumpen) aus tief liegenden Aquiferen förderbar sind oder – bei natürlichen Aufstössen und Quellen – deren Temperatur und chemische und isotopische Charakteristik auf eine Herkunft aus grosser Tiefe schliessen lässt [z. B. 5, 6, 9, 11]. «Tiefengrundwasser» diente als Überbegriff für viele als Thermal- und Mineralwasser beschriebene Wässer und schloss auch konnate (bei der Gesteinsbildung eingeschlossene) Wässer ein. Das Wasser im Porenraum von gering-permeablen Gesteinseinheiten (Aquitarde), das nicht mit konventionellen Methoden beprobt werden kann, wird hingegen als «Porenwasser» bezeichnet.

In den letzten Jahrzehnten sind verstärkte Anstrengungen zur Nutzung des tiefen geologischen Untergrundes unternommen worden. Dies betrifft die Erkundung des Untergrundes zur Erschliessung von Energierohstoffen und zur Entsorgung von Abfällen (radioaktive, CO₂), aber auch die Erstellung tief liegender Infrastrukturbauten. Stark zugenommen haben die Erkundungs- und Förderbohrungen zur Nutzung der Geothermie in unterschiedlicher Tiefe. Neue Technologien zur Förderung und Zwischenlagerung fossiler Energierohstoffe (z. B. Gas-Fracking, Gasspeicher) und zur Produktion von Geothermie (z. B. Stimulation durch Säuerung, Fracking) stehen zur Diskussion oder werden versuchsweise schon angewandt. Nicht zuletzt verstärken sich auch die Bestrebungen zur Nutzung der tief liegenden Grundwasservorkommen selbst und einige der angestrebten Nutzungen schliessen sich gegenseitig aus.

Bezüglich der tief liegenden Wasservorkommen verlangt diese Situation nach einer Bestandesaufnahme und nach einer Diskussion der rechtlichen Lage. Im Folgenden wird der Begriff «Tiefengrundwasser» definiert. Bekannte tief liegende Grundwasservorkommen werden bezüglich ihrer Verbreitung, ihrer geografischen Lage und Tiefe und ihrer Mineralisation beschrieben. Eine Diskussion über eine Anpassung der rechtlichen Grundlagen zum Schutz und zur Nutzung von Tiefengrundwässern wird angeregt.

TIEFENGRUNDWASSER: EIGENSCHAFTEN UND DEFINITION

Im Gegensatz zu oberflächennahem Grundwasser ist Tiefengrundwasser Bestandteil von meist grossräumigen Fliesssyste- men, wobei es während eines grossen Teils seiner Verweilzeit in grösserer Tiefe fliesst. Als Konsequenz weisen Tiefengrundwässer eine gegenüber den oberflächennahen Grundwässern

erhöhte und von den Jahreszeiten unabhängige Temperatur auf. Die Verweilzeiten im Untergrund hängen u. a. von der unterschiedlichen Durchlässigkeit der Aquifere, von der räumlichen Verteilung der Druckpotenziale und von der Länge der Fliesswege ab. Für Tiefengrundwässer betragen die Verweilzeiten in den meisten Fällen mehr als einige Jahrzehnte, d. h. sie weisen geringe bis nicht nachweisbare Aktivitäten des radiogenen Wasserstoffisotops Tritium (³H) auf.

Aufgrund der unterschiedlichen hydraulischen Charakteristika von Grundwasserleitern kann die Tiefenlage eines Grundwasservorkommens nicht alleine als bestimmendes Kriterium für Tiefengrundwasser angewendet werden. So können in Kluft- und Karstaquiferen bis in einige Hundert Meter Tiefe junge Grundwässer (d. h. verglichen mit dem atmosphärischen Eintrag hohe ³H-Aktivitäten) mit nur unwesentlich erhöhten Temperaturen vorliegen (z. B. [17]), während anderenorts Grundwasser in ähnlicher Tiefe nicht nachweisbare ³H-Aktivitäten und erhöhte Temperaturen aufweist (z. B. [7, 9]).

TIEFENGRUNDWASSER

Def.: Grundwasser, das mindestens drei der folgenden Bedingungen erfüllt: (1) Mineralisation in tiefliegenden Lithologien, (2) erhöhte Temperatur ($\Delta T > 5 \text{ }^\circ\text{C}$) gegenüber dem benachbarten oberflächennahen Grundwasser, (3) Verweilzeit von minimal mehreren Jahrzehnten (d. h. $< 1/4$ des atmosphärischen Eintrages von ³H), (4) lange Fliesswege im Untergrund.

Tiefengrundwässer unterliegen *in situ* der Möglichkeit eines advektiven Flusses und können durch konventionelle Methoden (Pumpen) gefördert werden. Die Benennung Tiefengrundwasser ist unabhängig von der Höhe der Gesamtmineralisation und der Ergiebigkeit des Aquifers.

HISTORISCHE ENTWICKLUNG DER BEGRIFFE

Wie einleitend gesagt, umfasst der Begriff «Tiefengrundwasser» unterschiedlich benannte Typen von Wasser im geologischen Untergrund wie Mineral-, Thermal-, Heil- und Badewasser. Historisch richtete sich die Terminologie nicht nur nach den chemisch-hydrogeologischen Kriterien eines bestimmten Wassertyps, sondern mehrheitlich nach dessen vorgesehener Nutzung. Die gemeinsamen chemisch-hydrogeologischen Nenner dieser Wässer sind deren Herkunft aus dem tiefen geologischen Untergrund, deren Abgeschirmtheit gegenüber anthropogenen Einflüssen und deren hygienische Reinheit [3, 4].

Die Definitionen der Begriffe «Mineral-» und «Thermalwasser» haben sich im Laufe der Zeit geändert. Beide Begriffe wurden ursprünglich im Zusammenhang mit den medizinischen Wirkungen von «mineralisiertem» und «temperiertem» Wasser festgelegt [3, 4]. In der Literatur und im allgemeinen Sprachgebrauch werden die Begriffe «Mineral-» und «Thermalwasser» teilweise gleichbedeutend und ohne einheitliche Definition verwendet. Ähnliches gilt für die Begriffe «Heil-» und «Tafelwasser», die für die Schweiz nicht definiert sind.

Mineralwasser

Für Mineralwasser wurde früher eine Mineralisation von mindestens 1 g/l gefordert [z. B. 3]. Im Laufe der Zeit änderte sich aber das Bedürfnis in Richtung geringer mineralisierter Wässer. So besteht heute keine Anforderung mehr an die Gesamtminera-

Tektonik	Anzahl Lokalitäten	Anzahl Wasser-zuflüsse	Tiefe (m u. GOK)	Geologie	TDS ¹⁾ (mg/l)	Wichtigste chemische Wassertypen	T (°C) Probe ²⁾	pH	³⁾ H (TU) ³⁾	Beprobung (Jahr)	Ref.
Tiefengrundwässer mit einer Gesamtmineralisation von <2,5 g/l											
Kristallin Nordschweiz	5	22	251-1643	Kristallin	616-1579	Na-HCO ₃ -SO ₄ / Na-SO ₄ -Cl/ (HCO ₃)	11,2-38,8	7,30-9,09	<0,7-6,7	1993-1994	[6, 9]
Tafeljura	16	19	>50-2170	Jura-Perm	612-2169	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -SO ₄ / Na-(Ca)-Cl-(SO ₄)	10,0-46,9	6,85-9,09	<0,2-13,8	1980-2007	[9, 11, 13, 16]
Faltenjura	30	40	nat. Aufstösse und bis 1480	Jura-Trias	253-2489	Ca-Mg-HCO ₃ / Ca-SO ₄ -(HCO ₃)/ Na-Mg-(Ca)-HCO ₃ -SO ₄ -Cl	10,7-43,4	6,40-8,92	<0,6-6,8	1965-2010	[5, 11, 13, 14, 16]
Molassebecken	17	17	125-980	Tertiär-Trias	311-2357	Ca-Mg-SO ₄ - (HCO ₃)/ Na-HCO ₃ - SO ₄ -Cl/ Na-Cl-SO ₄	11,5-23,8	7,37-8,95	<0,4-2,8	1977-2012	[5, 7, 8, 11, 13, 16]
Helvetikum & Ultrahelvetikum s.l.	37	49	nat. Aufstösse und bis 1410	Metamorphe Gesteine	307-2431	Ca-Mg-HCO ₃ / Na-HCO ₃ / Ca-(Mg)-SO ₄ / Na-(Ca)-SO ₄ -Cl	8,7-64,0	6,56-9,30	<0,3-19	1977-2009	[5, 14, 18]
Aar- & Gotthardmassiv	123	130	nat. Aufstösse und bis 1500	Kristallin	26-2570	Ca-Na-SO ₄ -TIC/ Na-Ca-SO ₄ - Cl-(F)/ Na-Cl-TIC	14,8-50,2	6,63-10,41	<2,0-5,6	1977-2014	[5, 9, 12, 14, 15]
Penninikum s.l.	16	33	nat. Aufstösse und bis 2400	Metamorphe Gesteine	722-2520	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -SO ₄ / Ca-(Mg)-SO ₄ / Ca-Na-SO ₄ -Cl	11,2-44,2	6,28-12,7	<0,4-19,7	1977-2007	[5, 10, 12, 14]
Australpin s.l.	1	1	nat. Aufstösse	Metamorphe Gesteine	1466		17,0	-	-		[14]
Tiefengrundwässer mit einer Gesamtmineralisation von >2,5 g/l											
Rheingraben	3	3	1250-1790	Trias	3361-44001	Na-Cl/ Na-Cl-SO ₄	51,2-77,6	5,61-8,40	0,4-1,3	1993-1994	[5, 14]
Kristallin Nordschweiz	4	5	470-2220	Kristallin	4580-8602	Na-Cl-SO ₄ / Na-SO ₄ / Na-Cl	17,8-30,1	6,28-7,75	<1,1-2,8	1983-1984	[6, 9]
Tafeljura	8	11	110-920	Trias	3361-15530	Ca-Mg-(Na)- SO ₄ -Cl/ Na-(Ca)-SO ₄ -Cl/ Na-Cl	14,1-41,5	6,59-8,40	<0,4-2,3	1980-1998	[9, 11, 13, 16]
Faltenjura	24	24	nat. Aufstösse und bis 880	Trias	2628-3999	Ca-Na-(Mg)- SO ₄ -Cl-(HCO ₃)/ Na-Ca-(Mg)-Cl- SO ₄ -(HCO ₃)	23,2-47,8	6,16-6,90	<1,0-24,3	1981-2005	[5, 11, 13, 14, 16]
Molassebecken	20	31	100-2530	Tertiär-Trias	2666-115157	Na-Cl; Na- Cl-SO ₄ / Na-(Ca)-(Mg)- Cl-(SO ₄)	13,5-64,0	6,30-8,80	<0,4-3,5	1963-2012	[5, 7, 8, 11, 13, 16]
Helvetikum & Ultrahelvetikum s.l.	2	2	nat. Aufstösse und bis 930	Metamorphe Gesteine	2760-4706	Ca-SO ₄ -HCO ₃ / Na-Ca-SO ₄ -Cl	15,2-30,1	6,25-7,94	-	1995-1996	[5, 14, 18]
Aar- & Gotthardmassiv	16	16	570-1710	Kristallin	2597-3999	Na-Ca-SO ₄ -Cl/ Ca-Na-SO ₄	26,2-43,7	5,45-9,34	-	2002-2006	[15]
Penninikum s.l.	8	12	275-440	Metamorphe Gesteine	2643-4950	Ca-SO ₄ -HCO ₃ / Na-Ca-SO ₄ -Cl	9,4-29,4	6,34-7,06	2-12,3	1977-2005	[5, 10, 12, 14]
Australpin s.l.	4	4	nat. Aufstösse und bis 1600	Metamorphe Gesteine	7340-17700	Na-HCO ₃ -Cl/ Na-HCO ₃ -SO ₄	5,2-29,0	7,33	-	1991-1997	[19]

¹⁾ TDS = totale Mineralisation; ²⁾ Temperatur bei Wasseraustritt an Oberfläche; ³⁾ ³⁾H nur von Bohrungen und kontaminationsfreien Tunnelleinflüssen, zu berücksichtigen ist das Entnahmedatum

Tab. 1 Vorkommen und Eigenschaften von Tiefengrundwässern in der Schweiz
Occurrences et caractéristiques des eaux souterraines profondes en Suisse

lisation eines genutzten Mineralwassers. Nach der in der Schweiz geltenden Verordnung des EDI von 2005 über Trink-, Quell- und Mineralwasser zeichnet sich ein natürliches Mineralwasser durch besondere geologische Herkunft, Art und Menge der mineralischen Bestandteile sowie ursprüngliche Reinheit aus.

Thermalwasser

Auch der Begriff «Thermalwasser» wird unterschiedlich verwendet. Am häufigsten wird ein Grundwasser als Thermalwasser bezeichnet, wenn dessen Temperatur bei der Exfiltration konstant und unabhängig von den Jahreszeiten mehr als 20 °C beträgt [3, 4, 5]. Diese fixierte Temperaturangabe vernachlässigt aber regionale klimatische und geologische Unterschiede. Obwohl viele der hier untersuchten Tiefengrundwässer diese Bedingung zu erfüllen scheinen (Tab. 1), fehlen doch für die meisten langzeitige Beobachtungen zur Erfüllung des Kriteriums der Temperaturkonstanz. Andere wiederum weisen gegenüber den benachbarten, oberflächennahen Grundwässern eine deutlich erhöhte Temperatur, aber eben unterhalb 20 °C auf.

DEFINITION «TIEFENGRUNDWASSER»

Grundsätzlich können aufgrund ihrer chemischen, isotopischen und hydrologischen Charakteristika zwei Endglieder von Tiefengrundwässern unterschieden werden. Das erste Endglied beinhaltet Grundwässer meteorischer Herkunft im tief liegenden Untergrund. Die Infiltration von Niederschlags- oder Schmelzwasser kann dabei teilweise schon während des Pleistozäns (oder sogar früher) oder teilweise auch erst im letzten Jahrhundert stattgefunden haben. Solche meteorischen Tiefengrundwässer nehmen ihre Mineralisation und Temperatur vor allem durch Wechselwirkungen mit den durchflossenen Gesteinseinheiten auf. Mit zunehmender Verweilzeit im Untergrund verlieren sie ihre kosmogenen radioaktiven Isotope durch den stetigen Zerfall. Die Mineralisation und Isotopensignatur solcher Tiefengrundwässer ist charakteristisch für die durchflossenen Lithologien. Die Gesamtmineralisation kann von <1 g/l bis zu >100 g/l reichen. Sehr hoch mineralisierte Solen entstehen durch Lösung von Mineralsalz. Tiefengrundwässer meteorischer Herkunft werden permanent erneuert, auch wenn die Erneuerungsrate schwierig zu bestimmen ist.

Das zweite Endglied stellen konnate Tiefengrundwässer dar, d. h. ursprünglich bei der Gesteinsbildung im Porenraum eingeschlossene Wässer, die im Gesteinverbund in die Tiefe gelangten. In Sedimenten handelt es sich meist um ehemaliges Meerwasser, das während der Diagenese und nachfolgend weiter verändert wurde. Lokal wurden solche konnate Wässer aus ihren Ursprungsgesteinen in durchlässigere Gesteinsformationen verdrängt (z. B. von der Meeresmolasse in die Süsswassermolasse [6, 7]). Fand im Verlauf der Zeit kein substanzialer Austausch mit geringer mineralisierten Grundwässern statt, weisen konnate Tiefengrundwässer meist eine Gesamtmineralisation im Bereich von Meerwasser (ca. 35 g/l) auf. Höhere Mineralisationen können z. B. auf Ionenfiltration während der Diagenese beruhen. Konnate Tiefengrundwässer unterliegen keiner Erneuerung.

Im geologischen Untergrund finden sich neben diesen Endgliedern auch die unterschiedlichsten Mischungen und Modifikationen derselben. Je länger die Verweilzeit eines Tiefengrundwassers im Untergrund ist, desto stärker wird neben Mineralreaktionen auch der diffusive Austausch mit Porenwasser in Aquitarden zur Mineralisation beitragen.

HEUTIGER KENNTNISSTAND

Im Vergleich mit der Erkundung von oberflächennahen Grundwasservorkommen ist diejenige von Tiefengrundwässern mit deutlich höherem logistischem und finanziellem Aufwand verbunden. Die regionale Variabilität des tiefen geologischen Untergrundes und der oft lokale Charakter der Befunde von Untersuchungen führen zu einer lückenhaften Kenntnis der Vorkommen von Tiefengrundwässern in der Schweiz. Aus dem schon seit Jahrhunderten anhaltenden Interesse an Thermal-, Heil- und Mineralwasservorkommen und später auch an der Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle resultierte zwar ein beachtlicher Datensatz mit teilweise langzeitigen Beobachtungen bezüglich der chemischen und teilweise auch der isotopischen Zusammensetzung von Tiefengrundwässern, was etliche Rückschlüsse auf deren Auftreten und Genese erlaubt. Die Kenntnisse weisen jedoch sowohl bezüglich der räumlichen Ausdehnung wie auch bezüglich der Eigenschaften der tief liegenden Grundwasservorkommen grosse Lücken

auf. Daten zur Durchlässigkeit bzw. zu Ergebligkeit von tief liegenden Grundwasservorkommen sind nur lokal bzw. punktuell vorhanden oder fehlen ganz. In Anbetracht der aktuell verstärkten Bestrebungen zur Nutzung des tiefen Untergrundes besteht ein Bedarf zur vertieften Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse und der Vorkommen von Tiefengrundwässern im geologischen Untergrund.

Die vorliegende Sichtung publizierter Daten von Tiefengrundwässern in der Schweiz ergab, dass solche an 334 Lokaltäten untersucht wurden (Fig. 1). Hierbei wurden Tiefengrundwässer, die in der Vertikalen in verschiedenen geologischen Einheiten in Bohrungen auftreten, als eine einzige Lokaltät gezählt, während Wasserzutritte zu Tunnels und Stollen in der Horizontalen als individuelle Lokaltäten gezählt wurden. Ein Grossteil der Chemie- und Isotopendaten stammt aus der *Nagra Hydrochemischen Datenbank* [6, 8, 9, 11, 16], aus der an der Universität Neuenburg zusammengestellten *BDF Geotherm-Datenbank* [14] und aus dem *Interreg IIIA-Projektbericht* [13]. Zusätzliche Daten wurden aus Publikationen in Fachzeitschriften entnommen. Aus den Datenquellen wurden nur Tiefengrundwässer berücksichtigt, von denen eine umfassende chemische Analyse und Angaben über Temperatur, Entnahmetiefe und Isotopendaten (^3H u/o $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) vorliegen. Insgesamt umfasst der gesichtete chemische Datensatz 419 Zutritte von Tiefengrundwasser in Bohrungen und Tunnels sowie von Quellen mit natürlich aufstossendem Tiefengrundwasser. Aufgrund der limitiert vorhandenen, heterogenen und ohne weitere Bearbeitung kaum vergleichbaren hydraulischen Daten erfolgen hier nur qualitative Angaben über hydraulische Eigenschaften der tief liegenden Grundwasserleiter.

Die räumliche Verteilung bekannter Vorkommen und Beobachtungspunkte von Tiefengrundwässern in der Schweiz widerspiegelt die bisherigen Nutzungsinteressen des geologischen Untergrundes, sei das für die Mineralwasserförderung, Rohstoffexploration, Tiefenlagerung von radioaktivem Abfall oder Infrastrukturbauten. So bestehen z. B. im alpinen Raum, insbesondere in den Zentralmassiven, zahlreiche Analysen von Wasserzutritten, welche während der Bauphase in Tunnels und Stollen entnommen wurden. Demgegenüber finden sich grössere Kenntnislücken im südlichen und westli-

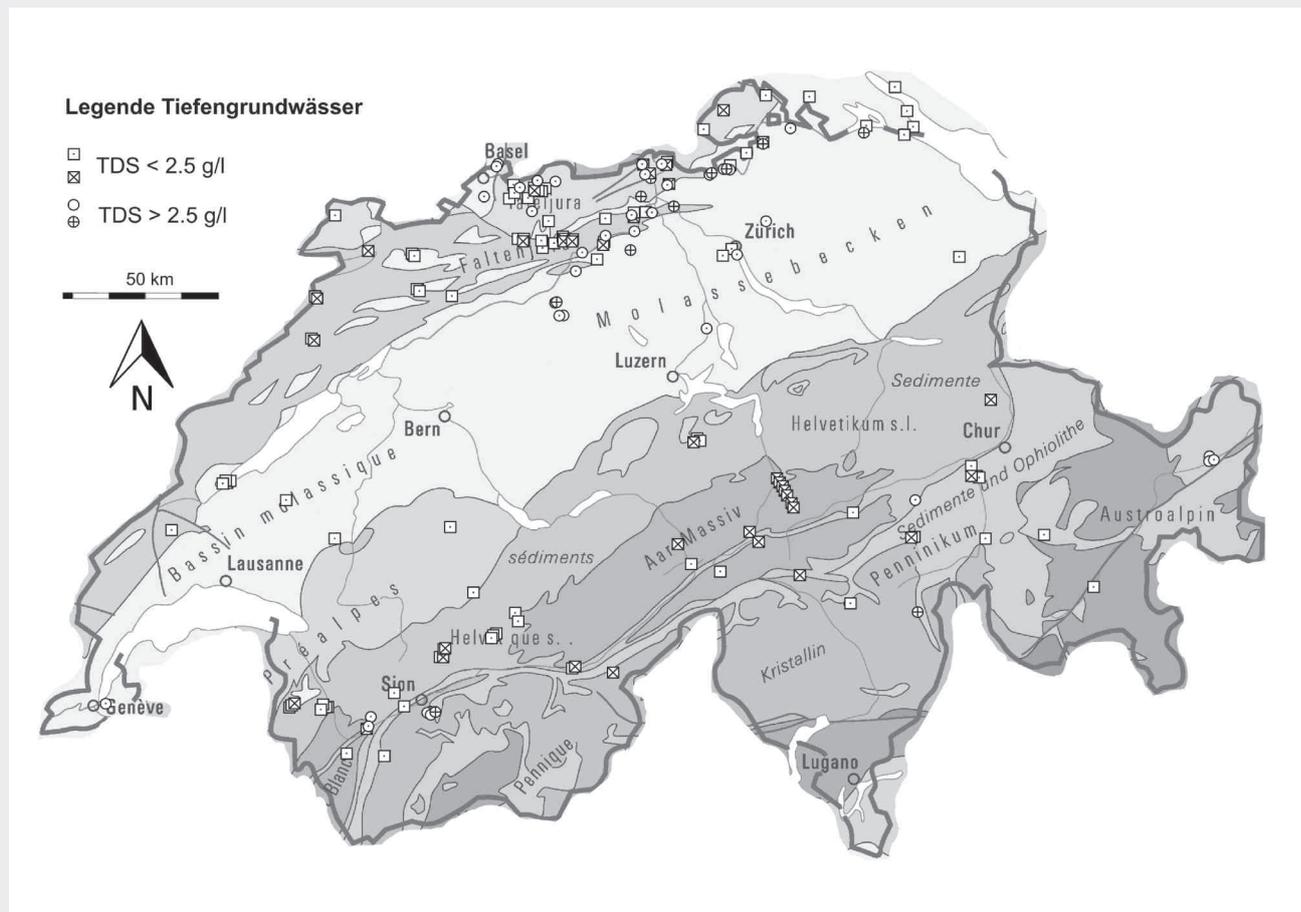


Fig. 1 Verbreitung bekannter Vorkommen von Tiefengrundwässern in den grosstektonischen Einheiten der Schweiz, von welchen analytische Daten vorhanden sind. Offene Symbole: Lokalität mit einem Wasserzutritt, Symbole mit Kreuz: Lokalität mit mehreren Wasserzutritten pro Lokalität (Bohrungen) (Quelle Hintergrundkarte: Bundesamt für Landestopografie)

Diffusion de la présence connue d'eaux souterraines profondes dans les grandes unités tectoniques de la Suisse dont des données analytiques sont disponibles. Symboles ouverts: localité avec une entrée d'eau; symboles avec une croix; localité avec plusieurs entrées d'eau par localité (perforations)

chen Molassebecken, dem Voralpenraum, dem Tessin und dem Engadin (Fig. 1). Dennoch kann festgestellt werden, dass in allen grosstektonischen Einheiten Tiefengrundwässer im geologischen Untergrund bis mehr als 2500 m Tiefe untersucht wurden (Tab. 1).

Die Gesamtmineralisation der vorliegenden Tiefengrundwässer deckt einen grossen Bereich von 0,03–115 g/l ab, welcher die unterschiedliche Entwicklung dieser Wässer widerspiegelt. Kommerziell genutzte Mineralwässer haben ohne Zugabe von CO_2 (Kohlensäure) eine maximale Gesamtmineralisation von rund 2,5 g/l. Dieser Wert wird als Grenze für die hier angewendete Unterscheidung zwischen «gering mineralisierten» und «höher mineralisierten» Tiefengrundwässern verwendet.

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

Die Mineralisation von Grundwasser entsteht durch Wechselwirkungen mit dem durchflossenen Gestein. Diese

Wechselwirkungen sind kinetische Prozesse, weshalb die Mineralisation von der Verweilzeit des Grundwassers im Untergrund abhängt. Nach Erreichen des Gleichgewichts mit der Aquifer-Mineralogie wird eine weitere Mineralisation nur durch Mischen mit einem anders zusammengesetzten Grundwasser oder beim Durchfliessen einer mineralogisch anders zusammengesetzten Gesteinseinheit verursacht.

In karbonatführenden Sedimenten erreicht Grundwasser aufgrund der Lösungsgleichgewichte eine Gesamtmineralisation von weniger als 1 g/l. Aufgrund von nachfolgenden Ionenaustauschreaktionen kann diese bis auf ca. 1–2 g/l erhöht werden. In solchen Lithologien finden sich die typischen Ca-HCO_3^- , Ca-Mg-HCO_3^- und Na-HCO_3^- -Typ Grundwässer. In siliziklastischen Sedimenten (z.B. Sandsteinen) und Kristallingesteinen erhält Grundwasser aufgrund der tiefen Minerallöslichkeiten und der langsamen

Reaktionskinetik auch über sehr lange Zeiträume kaum eine Gesamtmineralisation von mehr als 1 g/l. Typische Kristallingrundwässer sind generell den Na-TIC-SO_4^{-1} und Na-Ca-Cl-SO_4 -Typen zuzurechnen, wobei auch häufig erhöhte Gehalte an Fluor auftreten.

Einzig Grundwasser, das durch Evaporitgesteine fliesst, erreicht durch die Lösung von Gips/Anhydrit und/oder Steinsalz eine erhöhte Mineralisation, die 10 g/l überschreiten und bis zu mehr als 200 g/l (Solen) erreichen kann. Dabei entstehen die charakteristischen Ca-SO_4 - und Na-Cl -Typen und – durch Ionenaustausch – die Na-SO_4 -Typ Grundwässer.

Neben der Gips/Anhydrit- und Salzlösung führt das Mischen mit anders zusammengesetztem Grundwasser, insbe-

¹ Kristallingrundwässer haben meist alkalische pH-Werte und ähnliche HCO_3^- und CO_3^{2-} -Gehalte, weshalb die Angabe als TIC (anorganischer Kohlenstoff) und nicht HCO_3^- erfolgt.

sondere mit konnatem Wässern, zu einer erhöhten Mineralisation, bis sich erneut ein Gleichgewicht mit dem Gestein einstellt. Mischungen mit konnatem Wasser weisen häufig eine Gesamtmineralisation von ca. 10-50 g/l und durch Mischung mit durch Salzlösung generierten Wässern auch solche von >100 g/l auf [z.B. 9, 11, 16].

Von den 419 Tiefengrundwässern an 334 Lokalitäten der Schweiz weisen rund 75% eine Mineralisation von <2,5 g/l auf. Aufgrund der regionalen Gewichtung der Beobachtungspunkte stammen davon 51% aus dem alpinen Raum, 14% aus dem Jura, 5% aus dem tief liegenden Kristallin der Nordschweiz und 4% aus dem Molassebecken (Tab. 1). Knapp ein Viertel der bekannten Vorkommen weist eine Mineralisation von >2,5 g/l auf. Von nur gerade acht Lokalitäten sind Tiefengrundwässer mit einer Gesamtmineralisation von mehr als 20 g/l bekannt. Weder für die gering mineralisierten (<2,5 g/l) noch für die höher mineralisierten (>2,5 g/l) Tiefengrundwässer ergibt sich eine eindeutige Abhängigkeit mit der Tiefe des Vorkommens (Fig. 2).

Eine gewisse Abhängigkeit zwischen Vorkommen und Tiefe ergibt sich aber aufgrund des Aquifertyps und der grosstektonischen Einheiten (Fig. 2). In den typischen Karst- und Kluft-Aquifere des Tafel- und Faltenjura sowie der metamorphen Gesteinen des Penninikums s.l. und der Kristallingesteine im Alpenraum und der Nordschweiz finden sich gering mineralisierte Tiefengrundwässer bis in eine Tiefe von rund 2500 m unter der Oberfläche. Ein Grossteil dieser Tiefengrundwässer weist eine Gesamtmineralisation von <1 g/l auf und liegt somit bezüglich der Gesamtmineralisation im Bereich von Trinkwasser. Aus dem Molassebecken sind gering mineralisierte Grundwässer nur bis in Tiefen von rund 1000 m unter der Oberfläche untersucht.

Bei den höher mineralisierten Tiefengrundwässern präsentiert sich eine umgekehrte Situation. Höher mineralisierte Tiefengrundwässer sind vor allem im Molassebecken untersucht, wo sie schon ab wenigen Hundert Metern und bis in Tiefen von rund 2400 m auftreten (Fig. 2). Die höchsten Mineralisationen sind im zentralen Molassebecken anzutreffen und sind auf Beimengungen von konnatem Wasser und Salzlösung zurückzuführen [11, 16]. Zumindest in

den nördlichen Randzonen des Molassebeckens finden sich aber auch gering mineralisierte Tiefengrundwässer bis in Tiefen von rund 1000 m unter der Oberfläche. Im Rheingraben ist die erhöhte Mineralisation von bekannten Tiefengrundwässern durch Salzlösung zu erklären [11]. In den anderen tektonischen Grosseinheiten sind höher mineralisierte Tiefengrundwässer aufgrund der vorliegenden Daten selten und in Bohrungen bis rund 900 m Tiefe unter der Oberfläche bekannt.

HYDROGEOLOGIE

Die Bewegung von Grundwasser beruht auf Potenzialunterschieden von Druck, Dichte, Temperatur und Konzentration bzw. dem Bestreben, diese Unterschiede auszugleichen [20, 21]. Ähnlich wie bei oberflächennahen Grundwasserleitern wird auch bei tief liegenden Grundwasserleitern zwischen sog. homogen-porösen Aquifere und heterogen-porösen Kluft- und Karstaquifere unterschieden. In einem Aquifer ist im Porenraum des Gesteins ein advektiver Fluss vorhanden

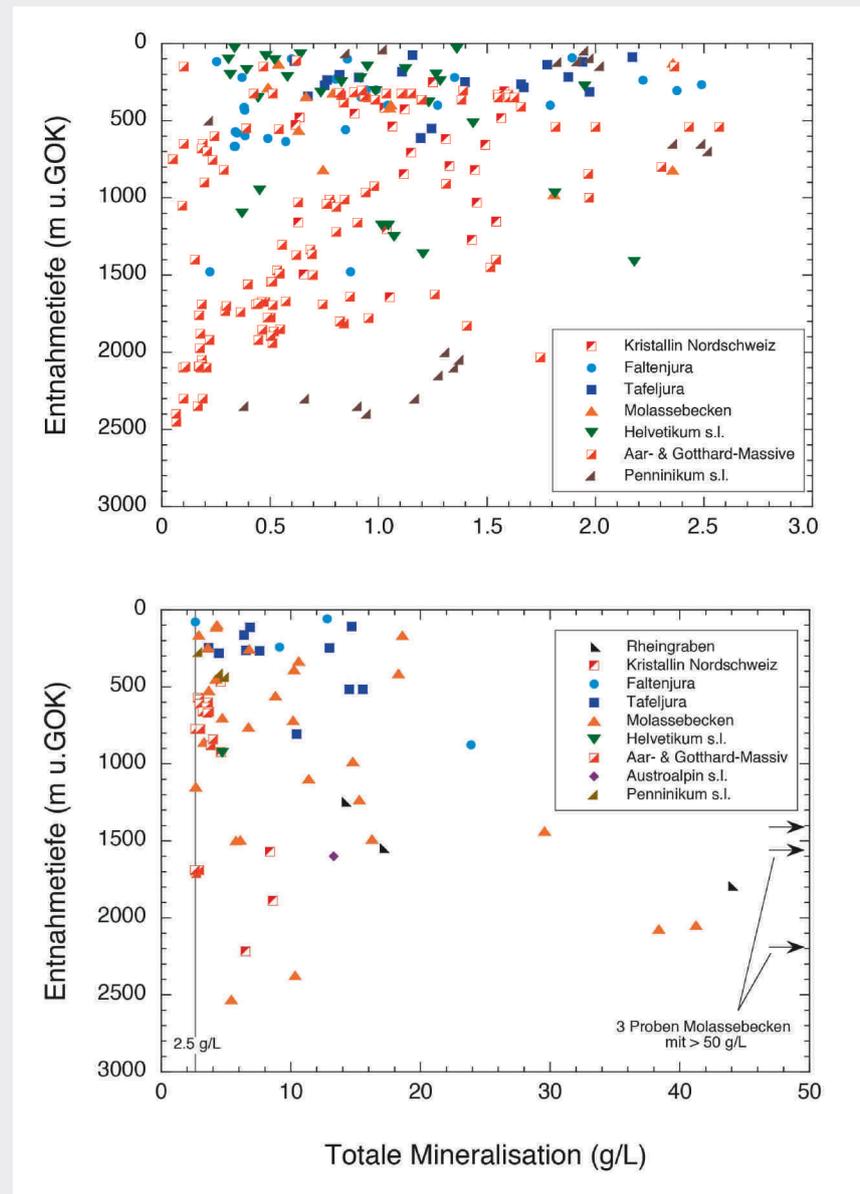


Fig. 2 Totale Mineralisation (TDS) von gering mineralisierten (oben) und höher mineralisierten (unten) Tiefengrundwässern als Funktion der Entnahmetiefe und unterteilt nach deren Vorkommen in den grosstektonischen Einheiten der Schweiz. Dargestellt sind nur Tiefengrundwässer, welche in Bohrungen und Tunnels beprobt wurden

Minéralisation totale (TDS) des eaux souterraines profondes faiblement minéralisées (en haut) et hautement minéralisées (en bas) en fonction de la profondeur d'échantillonnage et répartie en fonction de leur présence dans les grandes unités tectoniques de la Suisse. Seules les eaux échantillonnées dans des forages ou des tunnels sont présentées

oder es besteht zumindest die Möglichkeit dafür. In den gleichen Gesteinstypen nimmt die hydraulische Durchlässigkeit tendenziell mit der Tiefe ab. Diese Tendenz wird lokal durch tiefgreifende tektonische Kluft- und Störungssysteme und lösungsbedingte Karsterscheinungen modifiziert. Demgegenüber steht der Aquitard, der zwar ebenfalls beträchtliche Porositäten bis >15 Vol.-% aufweisen kann. Hier erlaubt die Verbindung der Poren untereinander aber einen nur sehr geringen oder keinen advektiven Fluss und der Stofftransport findet vorwiegend diffusiv statt. Aquitarde sind tonige Lithologien und intakte Blöcke von Gesteinsmatrix zwischen Klüften und Karststrukturen. Die Grundwasserzirkulation in der Nähe der Erdoberfläche wird neben der Durchlässigkeit insbesondere von der Lage des Grundwasserspiegels und der Topografie beeinflusst. Topografisch induzierter oder gravitativer Grundwasserfluss haben einen wesentlichen Einfluss auf die Ausdehnung und Eindringtiefe der unterschiedlichen (hierarchischen) Fliessysteme [z.B. 20, 22, 23]. Topografie-induzierter Grundwasserfluss kann deshalb auch in grossen Tiefen ein relevanter Motor für grossräumige Grundwasserbewegungen sein (z.B. in Sedimentbecken). Auch die Tatsache, dass sich in der Schweiz viele bekannte Thermalquellen im Bereich grosser Vorfluter (z.B. Aare, Rhein) befinden und Mischungen zwischen Grundwässern aus verschiedenen geologischen Einheiten auftreten können, kann als Hinweis auf das Vorhandensein grossräumiger Grundwasserzirkulationssys-

teme dienen [z.B. 24, 25, 26]. Während der Einfluss gravitationsgetriebener Zirkulationssysteme mit zunehmender Tiefe kleiner wird, nimmt die Wirkung von Dichte-induzierten Grundwasser-Zirkulationssystemen mit zunehmender Mineralisation der Tiefengrundwässer tendenziell zu [z.B. 27].

Von bekannten Vorkommen von Tiefengrundwässern sind Kenntnisse bezüglich hydraulischer Durchlässigkeiten, Speicherkoeffizienten, Ergiebigkeiten und Erneuerungsraten sowie das Verständnis der Dynamik und der Flieswege im geologischen Untergrund nur lokal bzw. punktuell vorhanden oder fehlen ganz. Die Interpretation von hydraulischen Daten in einem regionalen Massstab wird durch die in Sedimentgesteinen vorhandenen Fazieswechsellinien und die schwierige Vorhersage von Kluft- bzw. Karstnetzwerken im Untergrund erschwert. Während diese Erscheinungen nicht unbedingt mit einem Wechsel in der mineralogischen Zusammensetzung des Aquifers verbunden sind und somit den Chemismus eines Tiefengrundwasser nicht oder nur marginal beeinflussen, haben sie einen grossen Einfluss auf die hydraulischen Parameter des Aquifers.

Die Ergiebigkeit von bekannten Tiefengrundwasservorkommen ist gegenüber den oberflächennahen Vorkommen meist klein und schwankt über mehrere Grössenordnungen. In der Literatur angegebene Schüttungen bzw. aus Bohrungen förderbare Mengen variieren zwischen wenigen Millilitern bis zu mehreren Dekalitern pro Minute. Aufgrund der

Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit von der Gesteinstextur können hohe Durchlässigkeiten durchaus auch in grosser Tiefe auftreten, wie das spezielle Beispiel des Buntsandsteins im Molassebeckens der Nordschweiz aufzeigt ($k=10^{-4}$ bis 10^{-9} m/s, [9]).

Ähnlich wie an der Oberfläche hängt auch der Wasserfluss für Tiefengrundwasser von den wirkenden Gradienten und der Möglichkeit der Exfiltration ab. Dass Exfiltration von Tiefengrundwässern stattfindet, ist seit Jahrhunderten v.a. durch die natürlich aufstossenden Thermalquellen bekannt. Es wurde auch schon mehrfach auf deren Schutzwürdigkeit hingewiesen [24, 25]. Ebenfalls seit längerem wurde erkannt, dass sich auch nicht thermale Tiefengrundwässer entlang des Aquifers und/oder tektonischen Strukturen in Richtung Oberfläche bewegen können und sich dort mit oberflächennahen Grundwässern oder Oberflächengewässern mischen, wie es in *Figur 3* schematisch dargestellt ist. Beispiele dafür sind das Aufstossen von Tiefengrundwasser aus dem Malm im Raum Eglisau [7, 8], das Aufstossen von Solen und kristallinen Grundwässern im Raum Basel [11, 18, 25] und das Aufstossen von CO_2 -reichen Tiefengrundwässern in metamorphen Gesteinen im Engadin [19].

NUTZBARKEIT

Als nutzbar wird hier Tiefengrundwasser bezeichnet, das von der Qualität und von der Ergiebigkeit her in seiner natürlichen Form zur Nutzung als Trink-, Brauch- oder thermale Badewasser geeignet ist. Solche Nutzungen von Tiefengrundwasser finden sich an manchen Orten der Schweiz. Dabei handelt es sich mehrheitlich um als Mineral- und Thermalwasser bezeichnete Wässer (s. Kap. «Historische Entwicklung der Begriffe»). In Gebieten mit geringen oberflächennahen Grundwasser-Ressourcen wird Tiefengrundwasser fallweise auch als Trinkwasser genutzt [z.B. 28].

In Anbetracht der häufig geringen Mineralisation (*Tab. 1; Fig. 2*) sind gewisse Tiefengrundwässer als potenzielle Trinkwasserressourcen zu bezeichnen. Lokal stehen zudem Planungen und Umsetzungen von Projekten zur Gewinnung von Tiefengrundwasser zur Nutzung als Trink-, Mineral-, Bade- oder Brauchwasser an. Für den geologischen Untergrund nahm das Bedürfnis nach einer inten-

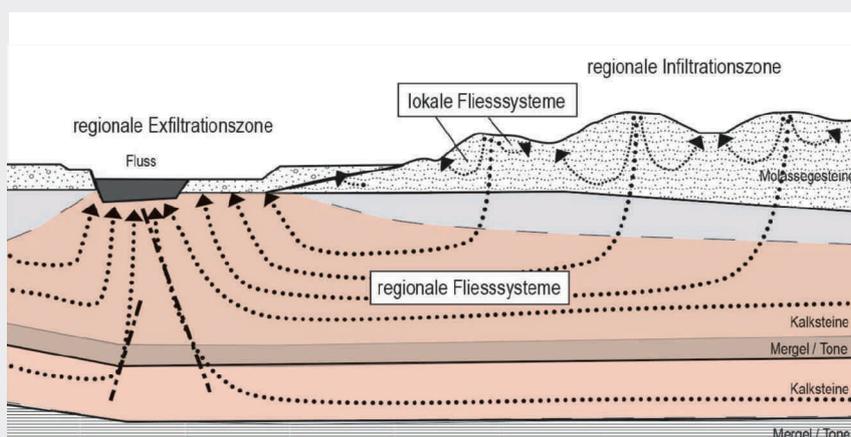


Fig. 3 Schematische Darstellung von möglichen Fließ- und Exfiltrationspfaden von Tiefengrundwasser an die Oberfläche. Mögliche Vorkommen von Tiefengrundwasser sind in hellrot dargestellt

Représentation schématique des chemins d'écoulement et d'exfiltration possibles des eaux souterraines profondes à la surface. La présence éventuelle d'eaux souterraines profondes est indiquée en rouge clair

siveren Nutzung in den letzten Jahren generell zu. Solche geplante oder schon durchgeführte Nutzungen, die in direkter oder indirekter Weise auch das Tiefengrundwasser einbeziehen, sind folgende:

- Untersuchungen für die Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen;
- geothermische Nutzung (hydrothermal, petrothermal) mit oder ohne Stimulation (z.B. Säuerung, Fracking), einschliesslich der tiefen Erdwärmesonden
- tiefe Infrastrukturbauten, ausgeführt (Tunnel, Stollen etc.) oder in Planung (z.B. Gasspeicher)
- Prüfung der Entsorgung von nicht radioaktivem Abfall im tiefen Untergrund (z.B. CO₂-Sequestrierung)
- die aktuell zur Diskussion stehende Gewinnung fossiler Energierohstoffe (Erdöl, Erdgas) mittels konventioneller Methoden und/oder Fracking.

Einzelne dieser Nutzungsinteressen des geologischen Untergrundes können sich gegenseitig konkurrieren. Abfallorientierte Nutzungen zielen auf eine Nutzung der abdichtenden Eigenschaften des geologischen Untergrundes und eine Minimierung des Stofftransportes darin über sehr lange Zeiträume. Dem entgegengesetzt sind Nutzungen, die auf eine Stimulierung des Stofftransportes im geologischen Untergrund durch technische Eingriffe zielen, wie z.B. das Fracking zur Erdgasförderung.

GEFÄHRDUNG

Generell sind Tiefengrundwässer gegenüber anthropogenen Einflüssen besser geschützt als oberflächennahe Grundwässer. Im Untergrund ist Tiefengrundwasser vor einer an der Oberfläche auftretenden Kontamination als Folge der längeren Fliesswege und längeren Verweilzeiten gut geschützt. Der bessere natürliche Schutz von Tiefengrundwasser gilt aber nicht für dessen Infiltrationsgebiet, wo die gleichen Bedingungen wie für oberflächennahe Grundwässer herrschen.

Bei den oben genannten, teilweise konkurrierenden Nutzungsinteressen besteht das Risiko, dass bei technischen und baulichen Eingriffen in den Untergrund eine Kontamination unmittelbar im tiefen Untergrund erfolgen kann. Dadurch werden der tiefe Grundwasserleiter und das Tiefengrundwasser potenziellen Verunreinigungen direkt

ausgesetzt. Die Reinigungsfunktion der Grundwasserleiter in der Tiefe ist insbesondere bei karbonatischen Karst-Aquiferen und Kluft-Aquiferen in Kristallingesteinen sehr klein. Zudem sind die wenig bekannten Erneuerungsraten von Tiefengrundwässern meist relativ bescheiden, sodass allfällige Verunreinigungen unter Umständen während sehr langer Zeit im Untergrund verweilen können. Die Erfassung und die Überwachung von Verunreinigungen ist schon im unteren Untergrund oft schwierig. Sie gestaltet sich im tiefen Untergrund aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit noch wesentlich schwieriger und ist mit ungleich höherem Aufwand verbunden. Dasselbe gilt für Sanierungen.

Bei Eingriffen in den tiefen Untergrund können unsachgemässes Vorgehen oder Pannen somit eine längerfristige qualitative oder quantitative Beeinträchtigung von Tiefengrundwasser verursachen. Dies wird umso wahrscheinlicher, je mehr solche Eingriffe erfolgen.

In Anbetracht des wachsenden Nutzungsdruckes auf den tiefen Untergrund ist demzufolge eine Gefährdung des Tiefengrundwassers gegeben. Auch wenn bestimmte Vorkommen von Tiefengrundwasser selbst wenig oder kein Nutzungspotenzial aufweisen, so kann auch eine geringe Grundwasserströmung Kontaminationen in andere, nutzbare Grundwasservorkommen verlagern. Technisch verursachte Kurzschlüsse von Aquiferen können also zu einer Beeinträchtigung von Qualität und hydrologischen Parametern von nutzbaren Grundwasservorkommen führen. Der natürlichen Exfiltration von Tiefengrundwässern und der allfälligen Mischung mit genutztem Oberflächenwasser [z.B. 7, 13, 16] ist ebenfalls Beachtung zu schenken. All diese Möglichkeiten können aufgrund der vorhandenen Daten nicht konkreter beurteilt werden. Es besteht der Bedarf nach situationsspezifischen hydrogeologischen Untersuchungen.

SCHUTZ

BESTEHENDE GESETZE

Nutzbare Tiefengrundwasser ist grundsätzlich durch die Gewässerschutzgesetzgebung geschützt (Wassermenge und -qualität; Grundwasserleiter natürliche Funktion, vgl. GSchG und GSchV [29, 30]). Allerdings definiert die Gewässerschutzverordnung den Begriff der Nutzbarkeit

von Grundwasser nur konkret in Bezug auf Trinkwasser. Thermal- und Mineralwasser sowie andere Brauchwassernutzungen werden nicht erwähnt.

Gewässerschutzbereiche

Zum Schutz der oberflächennahen Grundwasservorkommen werden durch die Kantone Gewässerschutzbereiche bezeichnet. Im Gewässerschutzbereich A_V benötigen Eingriffe, welche das Grundwasser gefährden können, eine gewässerschutzrechtliche Bewilligung, und es bestehen verschärfte Vorschriften zum Schutz des Grundwassers. Diese zielen darauf ab, das nutzbare Grundwasser qualitativ und quantitativ zu schützen und die Schutz- und Reinigungsfunktion des Grundwasserleiters zu erhalten. Sie basieren auf dem planerischen Grundwasserschutz, der in Artikel 19 GSchG [29] vorgegeben und in Artikel 29 GSchV in Verbindung mit Anhang 4 GSchV [30] konkretisiert ist. Die Dimension der Tiefe wird in diesem Gesetz und der Verordnungen nicht konkret berücksichtigt.

Umweltverträglichkeitsprüfung

Bei bestimmten Nutzungen des geologischen Untergrundes ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erforderlich. Massgebend ist dabei die Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV, [31]). Bei der UVP klärt der Gesuchsteller in einer Voruntersuchung ab, welche Auswirkungen seine Anlage auf die Umwelt haben könnte. Auch in der UVPV wird die Dimension der Tiefe nicht konkret berücksichtigt. Die *Espoo*-Konvention regelt die Auswirkungen im grenzüberschreitenden Rahmen (s. UVPV). Gerade im Hinblick auf die häufig wenig bekannten Infiltrationsgebiete von Tiefengrundwässern ist dies von besonderer Bedeutung (vgl. z.B. grenzüberschreitendes *Interreg IIIa*-Projekt [13]).

Zur Konkretisierung des Schutzes und zur Anwendung der bestehenden Schutzkonzepte auf Tiefengrundwasser sind daher angepasste Schutzkonzepte zu entwickeln und bestehende Vorschriften sollten den Verhältnissen des Tiefengrundwassers angepasst werden.

HEUTIGER SCHUTZ TIEF LIEGENDER GRUNDWASSERVORKOMMEN

Tiefengrundwasser wird von den Kantonen dort geschützt, wo es genutzt wird (konzessionierte Nutzungen von Tiefen-

grundwasser, z. B. Produktion von Mineralwasser, Thermalwasser). Allerdings fehlen häufig genaue Kenntnisse über die Lage des Grundwasserleiters, seines Einzugsgebietes, des Gradienten und Druckes im Grundwasserleiter und der Fliessgeschwindigkeiten des Tiefengrundwassers. Dies führt zu Schwierigkeiten bei der Festlegung und Definition der erforderlichen Schutzmassnahmen.

Bestrebungen zur (zumindest) teilweisen Behebung dieses Mankos sind im Gange. Zahlreiche Untersuchungen und Messungen wurden bereits realisiert (vgl. Kap. «Heutiger Kenntnisstand»). Die Wissenslücken bleiben dennoch gross. Neue wissenschaftliche Betrachtungsansätze erweitern das Verständnis der tiefen Fliesssysteme, so z. B. die regionalere Betrachtung von Einzugsgebieten und ihrer Überlappung, sog. *Catchment* und *Intercatchment Areas*, [z. B. 32]). Sie bedürfen aber noch einer deutlich erweiterten Vertiefung und Umsetzung in die Praxis.

Aufgrund des wachsenden Interesses an der Nutzung des tiefen Untergrundes haben verschiedene Gewässerschutzbehörden bereits konkrete Ansätze entwickelt:

- Informationen für Vollzugsbehörden, Bauherren, Projektgenieure und Umweltberichterstatter bei der Projektierung von Untertagebauten [33]
- Informationen für Vollzugsbehörden, Fachleute im Bereich Erdwärmennutzung und Bauherren bei der Projektierung von Anlagen zur Nutzung der Erdwärme [34]
- Information von Planern von Erdwärmesonden über Gebiete mit artesisch gespanntem Grundwasser, gips- und anhydritführenden Gesteinen und Gasvorkommen
- Auflagen, die bei der Ausführung von Bohrungen in heiklen Formationen zur Beherrschung der Risiken beitragen sollen, insbesondere auch von hydraulischen Kurzschlüssen zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken
- Auflagen zur Kontrolle der Hinterfüllungen von Bohrungen und Brunnen
- Strengere Auflagen für Bohrungen in Formationen mit bekannten tief liegenden Grundwasservorkommen (z.B. durch Tiefenbegrenzung für Erdwärmesonden über Top Malm in gewissen Gebieten des Kantons Aargau, bzw. über Top Malm/Top Obere Meeresmolasse in gewissen Gebieten des Kantons Zürich).

Bis die Vorkommen von Tiefengrundwasser besser untersucht und angepasste Schutzkonzepte entwickelt sind, ist das Tiefengrundwasser unabhängig von einer möglichen Nutzung gleich wie andere wichtige Umweltbereiche vorsorglich zu schützen. Im Rahmen von Konzessionsgesuchen zur Nutzung des tiefen geologischen Untergrundes ist vom Gesuchsteller der Nachweis zu verlangen, dass keine erheblichen Auswirkungen auf das Tiefengrundwasser zu erwarten sind. Mögliche sekundäre Auswirkungen auf andere Grundwasservorkommen sind ebenfalls in Betracht zu ziehen.

ABWÄGEN VERSCHIEDENER NUTZUNGSOPTIONEN

Nutzbares Grundwasser – auch Tiefengrundwasser – ist vom Gesetz her grundsätzlich geschützt. Allerdings ist der Begriff der Nutzbarkeit – und damit der Schutzwürdigkeit – auf die potenzielle Verwendung als Trinkwasser ausgerichtet. Andere Nutzungen von Tiefengrundwasser sind nicht explizit erwähnt und geniessen daher nicht den gleichen Schutz. Bisher ungenutzte und natürlicherweise gut geschützte Vorkommen von Tiefengrund-

wasser – vor allem solche geringer Mineralisation – können in Zukunft durch absehbare Veränderungen in den ökonomischen und ökologischen Bedingungen an Bedeutung gewinnen.

Gegenwärtig ist die Grundlage für eine gesamtgesellschaftliche Abwägung der möglichen Nutzungen des tiefen Untergrundes nicht vorhanden. Es fehlen dazu flächendeckende Kenntnisse über den tiefen geologischen Untergrund und die vorhandenen Ressourcen einschliesslich der tiefen Grundwasservorkommen. Zur Abwägung von Konkurrenzsituationen und der Bevorzugung einer spezifischen Nutzung müssen diese Kenntnislücken geschlossen werden. Dazu sind Strategien zur gebietsweisen Erkundung und zur Nutzung bzw. zum Schutz der Ressourcen im tiefen geologischen Untergrund zu entwickeln.

Die Abwägung von Nutzungsinteressen ist u. a. auch ein gesellschaftlicher Entscheid. Er hat auf Basis von fundierten Kenntnissen der Geologie und der vorhandenen Ressourcen, inklusive des Tiefengrundwassers, zu erfolgen. Bei der Frage der Nutzung des Tiefengrundwassers als Trinkwasser bzw. des tiefen Untergrundes als Trinkwasserspeicher sind die Ergiebigkeit und der Schutz der vorhandenen oberflächennahen Grundwasservorkommen, die Prognosen für die künftige Ergiebigkeit (aufgrund der Klimaänderung) und die künftigen Bedürfnisse zu berücksichtigen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Tiefengrundwasser stellt als Teil unterirdischer Wasservorkommen grundsätzlich eine wichtige Ressource dar. Diese umfasst sowohl die aktuell genutzten als auch die potenziell in Zukunft nutzbaren Tiefengrundwasservorkommen.

Eine Sichtung bestehender Daten über Vorkommen von Tiefengrundwasser zeigt, dass

- a) Tiefengrundwasser im geologischen Untergrund der Schweiz mehrheitlich gering mineralisiert ist (<2,5 g/l),
- b) an gewissen Lokalitäten bezüglich der Mineralisation Trinkwasserqualität aufweist,
- c) in Tiefen bis <2,5 km nachgewiesen ist,
- d) an gewissen Lokalitäten heute schon genutzt wird oder ein Nutzungspotenzial hat und
- e) die Exfiltration von Tiefengrundwasser in Oberflächengewässer und oberflächennahe (genutzte) Grundwasservorkommen an vielen Stellen bekannt ist.

Ausreichende Erkenntnisse zu den Vorkommen, zu deren Ausdehnung und zur Ergiebigkeit von Tiefengrundwasservorkommen fehlen häufig, weshalb aktuell ein vorsorglicher Schutz des Tiefengrundwassers vordringlich ist. Auch Tiefengrundwasser kann kontaminiert werden und so zur Verunreinigung von oberflächennahem Grundwasser beitragen. Bei der Planung von Nutzungen des tiefen Untergrundes sind die bekannten Vorkommen von Tiefengrundwasser zu berücksichtigen. Nutzungskonflikte können so frühzeitig erkannt und Lösungen sollten auf Basis eines breit abgestützten Konsenses ausgearbeitet werden.

Bestehende Kenntnislücken über das Auftreten, die Wegsamkeiten und die geochemische Entwicklung (Mineralisation) von Tiefengrundwasser sollten geschlossen werden. Sie ergeben den Bedarf für weitere Erkundungen des tiefen geologischen Untergrundes und der transparenten Verbreitung erarbeiteter Resultate. Ein Handlungsbedarf besteht unseres Erachtens auch bei der Koordination der Nutzung von Ressourcen. Auf

Bundesebene sollten konkrete Vorgehensweisen und Empfehlungen zum Einbezug des Schutzgutes Tiefengrundwasser bei Bauvorhaben oder Nutzungen des tiefen geologischen Untergrundes ausgearbeitet werden.

ANMERKUNG

Der vorliegende Artikel wurde von der Arbeitsgruppe «Tiefengrundwasser» der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie (SGH) ausgearbeitet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Sinreich, M. et al. (2012): Grundwasserressourcen in der Schweiz. *Aqua & Gas* 9, 16-28
- [2] Nussberger, G. (1914): Heilquellen und Bäder im Kanton Graubünden. *Verkehrsverein Graubünden*, 137p
- [3] Carlé, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa. *Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft MBH, Stuttgart*, 643p
- [4] Högl, O. (1980): Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. *Verlag Paul Haupt Bern und Stuttgart*, 302p
- [5] Vuataz F.D. (1982): Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limithrophes. *Matér. Géol. Suisse, Sér. Hydrol.*, 29, 174p
- [6] Schmassmann, H. et al. (1984): Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. *Nagra Technischer Bericht NTB 84-21. Nagra, Wettingen*
- [7] Balderer W. (1990): Hydrogeologische Charakterisierung der Grundwasservorkommen innerhalb der Molasse der Nordostschweiz aufgrund von hydrochemischen und Isotopenuntersuchungen. *Steir. Beitr. zur Hydrogeologie*, 41: 35-104
- [8] Schmassmann, H. (1990): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malm-Aquifere. *Nagra Technischer Bericht NTB 88-07. Nagra, Wettingen*
- [9] Schmassmann, H. et al. (1992): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Buntsandstein-, Perm- und Kristallin-Aquifere. *Nagra Technischer Bericht NTB 91-30. Nagra, Wettingen*
- [10] Bianchetti, G. et al. (1992): Deep groundwater circulation in the Alps : Relations between water infiltration, induced seismicity and thermal spring. The case of Val d'Illiez, Wallis. *Ecl. Geol. Helv.* 85/2, 291-305
- [11] Biehler, D. et al. (1993): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Dogger-, Lias-, Keuper- und Muschelkalk-Aquifere. *Nagra Technischer Bericht NTB 92-08. Nagra, Wettingen*, 410 pp
- [12] Pastorelli, S. et al. (2001): Chemistry, isotope values (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{34}S_{SO_4}$) and temperatures of the water inflows in two Gotthard tunnels, Swiss Alps. *App. Geochem.* 16, 633-649
- [13] Interreg IIIA (2008): Alpenrhein – Bodensee – Hochrhein. Grenzüberschreitende Bewirtschaftung des Grundwassers im Raum Hegau – Schaffhausen 2003–2007, Abschlussbericht. Unveröff. EU Projektbericht, 85 pp
- [14] Sonney, R.; Vuataz, F.D. (2008): Properties of geothermal fluids in Switzerland: A new interactive database. *Geothermics* 37, 496-509
- [15] Bucher, K. et al. (2012): Water deep inside the mountains: Unique water samples from the Gotthard rail base tunnel. *Chem. Geol.* 334, 240-253
- [16] Waber, H.N. et al. (2014): Hydrochemie und Isotopenhydrogeologie von Tiefengrundwässern in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland. Unpubl. Nagra Arbeitsbericht. Nagra, Wettingen, Schweiz
- [17] Offerding, U.S. et al. (2004): Environmental Isotopes as Indicator for Ground Water Recharge to Fractured Granite. *Groundwater* 42/6, 868-879
- [18] Nagra (1996): Geosynthese Wellenberg 1996. *Nagra Technischer Bericht NTB 96-01, Wettingen*
- [19] Bissig, P. et al. (2006): Carbogaseous spring waters, coldwater geysers and dry CO₂ exhalations in the tectonic window of the Lower Engadine Valley, Switzerland. *Eclogae Geol. Helv.* 99, 143-155
- [20] Domenico, P.A.; Schwartz, F.W. (1990): *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, New York, 824 pp
- [21] Ingebritsen, S. et al. (1998): *Groundwater in Geologic processes*, Cambridge, 536p
- [22] Toth, J. (1962): A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta. *J. Geophys. Res.* 67, pp. 4375-4387
- [23] Žijl, W. (1999): Scale aspects of groundwater flow and transport systems. *Hydrogeology Journal* 7 (1), 139-150
- [24] Burger, H. (2009): *Vorkommen, Nutzung und Schutz von Thermalwässern und Mineralwässern im Kanton Aargau: eine Übersicht*. *Swiss. Bull. angew. Geol.* 14, 13-27
- [25] Burger, H. (2011): *Die Thermalwässer und Mineralwässer im Kanton Aargau und seiner Umgebung*. *Aargauer Naturf. Ges., Mitteilung* 2011, Band 37, 91-111
- [26] Butscher, C. et al. (2011): Impact of tunneling on regional ground-water flow and implications for swelling of clay-sulfate rocks. *Eng. Geol.* 122, 204-214
- [27] Bachu, S. (1995): Flow of variable-density formation water in deep sloping aquifers: review of methods of representation with case studies. *J. of Hydrology* 164, pp.19-38
- [28] Muralt, R. (1999): *Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaire du Malm de l'arc jurassien*. *Beitr. Geol. Schweiz, Geotechnische Serie* 82
- [29] Schweizerische Eidgenossenschaft (1991): *Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG), Stand 1.1.2011*, Bern
- [30] Schweizerische Eidgenossenschaft (1998): *Gewässerschutzverordnung (GSchG), Stand 1.8.2011*, Bern
- [31] Schweizerische Eidgenossenschaft (1988): *Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung, Stand 1.6.2012*, Bern
- [32] Huggenberger, P. et al. (2013): *Concepts for the sustainable management of multi-scale flow systems: the groundwater system within the Laufen Basin, Switzerland*, *Environ. Earth Sci.* 69, 645-661
- [33] *Wegleitung zur Umsetzung des Grundwasserschutzes bei Untertagebauten (1998): Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern*
- [34] *Vollzugshilfe Wärmenutzung aus Boden und Untergrund (2009): Bundesamt für Umwelt, Bern*

> SUITE DU RÉSUMÉ

prise en compte. De cette façon, les éventuels conflits d'utilisation peuvent être détectés à un stade précoce et des solutions élaborées sur la base d'un vaste consensus.

Les lacunes existantes dans les connaissances sur l'occurrence, les voies de passage et l'évolution géochimique (minéralisation) des eaux souterraines profondes doivent être comblées. Elles se traduisent par la nécessité de poursuivre les explorations du substrat géologique profond et de diffuser les résultats obtenus de manière transparente. À notre avis, le besoin d'agir réside également dans la coordination de l'utilisation des ressources. Au niveau fédéral, des pratiques et des recommandations concrètes doivent être développées pour l'inclusion du patrimoine à protéger que représentent les eaux souterraines profondes dans les projets de construction ou les utilisations du sous-sol géologique profond.