Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 21 (2016)

Heft: 1

Artikel: Nutzung und Schutz von Tiefengrundwasser im Spannungsfeld von Chancen, Risiken, Konflikten und regulatorischen Anforderungen = Use and protection of deep groundwater in the conflict between opportunities, risks and regulatory requirements

Autor: Burger, Hans

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-658187

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 21/1, 2016 S. 69-90

Nutzung und Schutz von Tiefengrundwasser im Spannungsfeld von Chancen, Risiken, Konflikten und regulatorischen Anforderungen

Use and protection of deep groundwater in the conflict between opportunities, risks and regulatory requirements

Hans Burger[1]

Keywords: Grundwasser, Thermalwasser, Mineralwasser, Gewässerschutz, Wasserwirtschaft, Untergrundnutzung

Zusammenfassung

Die Schweiz besitzt ausgedehnte Tiefengrundwässer, welche sich in ihrem Chemismus regional stark unterscheiden und die bisher nur punktuell untersucht wurden. Jedes Tiefengrundwasser hat bezüglich Ausdehnung, Temperatur, Chemismus, Erneuerungsrate und Zirkulation (Fliessverhalten) seine eigene Charakteristik. Diese Parameter entscheiden auch über die Nutzbarkeit. Eine nachhaltige Nutzung von Tiefengrundwässern nimmt Rücksicht auf deren meistens geringe Erneuerungsraten und setzt hydrogeologische Untersuchungen voraus.

Die bisher bekannten Tiefengrundwässer der Schweiz besitzen im obersten Kilometer nicht selten Trinkwasser-Qualität. Hauptnutzer sind die Mineralwasser-Industrie und die Thermalbäder. Künftig könnten weitere Nutzungen hinzukommen, insbesondere die hydrothermale Tiefengeothermie und die Landwirtschaft (saisonale Bewässerung in Trockenperioden). Ein erhöhter Nutzungsdruck sowie Bauvorhaben im tiefen Untergrund oder die Einlagerung von CO_2 in die Tiefengrundwässer können zu Nutzungskonflikten führen. Die Nutzung der Tiefengrundwässer erfolgt heute weitgehend unkoordiniert. Dies führt dazu, dass qualitativ hochwertige Grundwässer auch für Zwecke genutzt und «verbraucht» werden können, für welche auch minderwertige Wässer genügen würden. Die koordinierte und planbare Nutzung der unterschiedlichen Tiefengrundwässer setzt grundlegende Ressourcen-Kenntnisse voraus, welche in den meisten Regionen der Schweiz noch nicht vorhanden sind. Eine regionale, wertebasierte Nutzungs-Priorisierung kann Nutzungskonflikte entschärfen, dazu müsste jedoch der gesetzgeberische Rahmen aktualisiert werden.

Abstract

Deep groundwater is characterized by long flow paths in deep rock aquifers, usually with long residence times. Switzerland has extensive deep groundwater, which differs greatly in its chemical composition from region to region and has been studied only selectively. Each deep groundwater has in terms of spread, temperature, chemistry, renewal rate and circulation (flow behavior) its own characteristics. These parameters also determine the usability. For a sustainable use of deep groundwater consideration must be made of the mostly low renewal rate and hydrogeological investigation is necessary.

The top kilometer of the currently known deep groundwater sources in Switzerland has often drinking water quality. Main users are the bottled water industry and the thermal baths. In future might be added further uses, especially hydrothermal geothermal energy and agriculture (seasonal irrigation during dry periods). If the groundwater is not used for drinking, its protection is currently still incomplete or inadequate. Increased use and construction projects in the depths of the earth or the storage of CO_2 in the deep groundwater can lead to water use conflicts. The use of deep groundwater is nowadays largely uncoordinated. This means that high-quality groundwater is often used and consumed for purposes for which also substandard water would suffice. The coordinated and predictable use of different types of deep groundwater requires basic knowledge of resources, which is not yet available in most regions of Switzerland.

Conflicts in the use of deep groundwater resources can be avoided or solved better if a general planning strategy is used and if a regional framework usage prioritization is made. Such regional, value-based usage prioritization can be worked out if a legislative framework is in place.

[1] Hans Burger, Rebbergstrasse 91, Ennetbaden, Switzerland [burger5408@gmx.ch]

1 Einleitung und Übersicht zur Problematik

1.1 Definitionen und Kenntnisstand

Unter Tiefengrundwasser sind jene Felsgrundwässer zu verstehen, welche durch ihren Fliessweg im tiefen Untergrund geprägt werden und in der Regel eine lange Verweilzeit aufweisen. Je nach Entstehung der Wirtgesteins-Porosität können drei Haupttypen von Tiefengrundwasser unterschieden werden: sedimentäre Aquifere (z. B. Sandstein), Kluftwässer in kristallinen Gesteinen und / oder tektonisierten Zonen sowie Karstwässer in karbonatreichen und evaporitreichen Gesteinen. Eine praktikable Definition zum Tiefengrundwasser findet sich in Waber et al. (2015, S. 33, S. 35). Ein Teil dieser Grundwässer hat eine direkte hydraulische Verbindung zur Oberfläche (Quellaustritte) oder in oberflächennahes Lockergesteins-Grundwasser, in denen sie Anomalien (Temperatur, Chemismus) bewirken.

Die Abgrenzung des Tiefengrundwassers zu den nicht nutzbaren Porenwässern in Aquitarden und Aquicluden erfolgt über die Durchlässigkeit des Aquifers bzw. Aquitarden: Tiefengrundwasser kann durch Pumpen bzw. durch Ausnutzen eines Druckpotenzials gefördert werden. Es wird zudem von benachbarten Aquitarden durch langsame hydrochemische Austauschprozesse verändert. Über Menge und Lage der Tiefengrundwässer in der Schweiz und deren Wasserfliesswege von der Einsickerungsfläche bis zu den Exfiltrationszonen ist noch wenig bekannt, es gibt aber erste Daten (Balderer 1990, Sinreich et al. 2012, Waber et al. 2015). Lage und Eigenschaften tiefer Grundwasserkörper werden im Ausland regional untersucht (z. B. Stober & Bucher 1999, Strayle et al. 1994, Österr. Arbeitskreis Grundwasser des BMLFUW 2002). Österreich unterscheidet dabei etwas undifferenziert die Kategorien «Tiefengrundwässer mit Trinkwassereigenschaften», «Thermalwässer» und «Mineralwässer».

Grundwasser hat eine ökonomisch grosse Bedeutung (Margat & van der Gun 2013), wobei mengenmässig global etwa ähnlich viel Grundwasser vorhanden ist wie Eis in Gletschern und im Polareis. Eine neue Arbeit (Gleeson et al. 2016) schätzt das Grundwasservolumen in den obersten zwei Kilometern der kontinentalen Kruste auf 23 Mio. km^3; zum Vergleich: der Genfersee fasst 90 km^3, der Zugersee 3 km^3 Wasser. Das Grundwasser liegt überwiegend in Form von Tiefengrundwasser vor, welches somit eine bedeutende Wasserressource darstellt. Weil es sich dabei zum grossen Teil um fossiles oder um sich sehr langsam erneuerndes Grundwasser handelt, ergeben sich bei einer nachhaltigen Nutzung nur relativ bescheidene Förderraten.

Die Charakterisierung und gegenseitige Abgrenzung von Tiefengrundwässern erfolgt auf Grund ihrer Zugehörigkeit zu einem – oft fast statischen – Fliesssystem und anhand des Chemismus. Die Datenerhebung erfolgt einerseits durch die Analyse von Quellwasser und von aufsteigenden oder geförderten Wässern, Gasen und Fluiden aus Bohrungen, anderseits durch gezielte Beprobung von wasserführenden Horizonten in Tiefbohrungen und Tunnelbauwerken. Wie umfangreich diese Analysen sein sollten, um möglichst zuverlässige Rückschlüsse auf das Tiefengrundwasser, dessen Herkunft und Interaktion mit dem Gestein sowie die Verweilzeiten ziehen zu können, zeigt eine Beschreibung von Giggenbach (1991):

The constituents of geothermal fluids can be divided into two main groups :

- *tracers are non-reactive elements, which, once added to the fluid phase should remain unchanged providing a direction to track back to their source components. Example are the noble gasses and elements such as Cl, B, Li, Rb and N_2.*
- *geoindicators are those reactive species that respond to changes in their host envi-*

ronment. Na, K, Mg, Ca, SiO_2 take part to temperature-dependent reactions with the alumino-silicates rock usually forming the geothermal reservoir. Moreover elements like H_2, H_2S, CH_4 and CO_2 are usually involved in temperature and pressure-dependent redox reactions between each other's or with redox systems of the rock phase.

Dies veranschaulicht, dass für eine Klassierung und Charakterisierung der Tiefengrundwässer eine relativ grosse Anzahl Parameter zu messen ist. In der Schweiz kommen aus lokalgeologischen Gründen noch die wichtigen Parameter Sulfat und Hydrogenkarbonat hinzu. Während die Analyse von genutzten Tiefengrundwässern im Interesse der Nutzer erfolgt und entsprechend gut dokumentiert ist (für die Schweiz: Högl 1980, Vuataz 1982), wird die Analyse weiterer Tiefengrundwässer eher zögerlich angegangen, obwohl dies für die hydrogeologische Erforschung des Untergrunds eine Voraussetzung ist. Bei den Untertagebauwerken besteht wegen der korrosiven Wirkung vieler Tiefengrundwässer zwar ein Eigeninteresse der Bauherrschaft an einer Analyse, doch werden häufig nur wenige Mischwässer beprobt (Wegmüller 2001). Bessere Daten liegen aus sehr langen und neuesten Tunnelbauwerken vor (Guntli et al. 2016, Bucher et al. 2012, Keller et al. 1987, Lützenkirchen 2002, Pesendorfer & Löw 2010, Bianchetti et al. 1993, Masset & Löw 2010). Ebenfalls vorbildlich ist die Nagra, welche seit drei Jahrzehnten ausgedehnte Beprobungen durchführt und die Auswertungen und Dokumentationen publiziert, insbesondere zu den Tiefengrundwässern der Nordschweiz (Schmassmann et al. 1984, Schmassmann 1990b, Schmassmann et al. 1992, Biehler et al. 1993, Thury et al. 1994, Nagra 2002, Nagra 2008, Waber et al. 2014). Auch aus dem westlichen Jura liegen gute Daten vor (z. B. Boem et al. 2006, Hessenauer & Flury 2010). Markierversuche und spezielle Isotopenmessungen können ebenfalls zur Abgrenzung einzelner Tiefengrundwässer und deren Herkunft, Fliessbewegungen und Verweilzeit beitragen; Beispiel Gotthard-Tunnel: Pastorelli et al. 2001. Heute ist die hydrogeologische Analyse von Wasser-Gestein-Interaktionen in grösseren Grundwasserprovinzen mit unterschiedlichen Tiefengrundwässern limitiert auf Gegenden, wo anderweitige Nutzungen des tiefen Untergrundes der Beweggrund für Untersuchungen war. Sie sind dementsprechend lokal und selten.

Eine Zusammenstellung der verschiedenen Chemismen im Tiefengrundwasser der Schweiz wird in Waber et al. 2015 (Tab. 1 und Fig. 1, 2) vorgestellt. Dabei zeigt es sich, dass die meisten dieser Tiefengrundwässer eine für Nutzungen günstige Gesamtmineralisation von weniger als 2.5 g/l aufweisen. Allerdings steigt die Mineralisation in Tiefen unterhalb eines Kilometers in der Regel deutlich an.

Weitere 17 Tiefengrundwasser-Chemismen im ausseralpinen Raum (USA, Deutschland, Japan) finden sich in Griebler & Mösslacher (2003, Tab. 2.2). Von diesen Felsgrundwässern weisen nur zwei einen «Salzwasser-Charakter» auf, drei haben eine Mineralisation zwischen 2 und 4 g/l, die übrigen zwölf sind nur schwach mineralisiert (unter 1 g/l). Auch die detaillierte Untersuchung der kalifornischen Tiefengrundwässer zeigt, dass bis in sehr grosse Tiefen nutzbare Wässer vorhanden sind (Kang & Jackson 2016). Dies soll jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass in vielen Regionen stark salzhaltige bis hochsalinare Tiefengrundwässer vorherrschen, deren Nutzung eine grosse technische Herausforderung darstellt (Frick et al. 2011). Eine ausführliche Untersuchung des Chemismus der Mineralwässer von Europa geben Reimann & Birke (2010). Darin wurden von über 800 Mineralwässern je 63 Elemente, 5 molekulare Substanzen und 3 physikalische Parameter analysiert. Eine Übersicht dazu, mit statistischer Auswertung dieser enormen Datenmenge, gibt Demetriades et al. 2015.

1.2 Nutzungsdruck durch neue Nutzungsvorhaben und durch den Klimawandel

Bei knapper werdenden Wasserressourcen (Klimawandel) oder bei einem deutlich steigenden Bedarf durch neue Wassernutzungen kann in der Schweiz entweder eine Verbrauchsoptimierung (Reduktion) angestrebt werden, oder es müsste auf Tiefengrundwasser zurückgegriffen werden.

Eine Grundwassernutzung ist nur dann nachhaltig, wenn sie auch die Bedingungen von Art. 43 des Gewässerschutzgesetzes erfüllt, dass nämlich einem Grundwasser-Vorkommen langfristig nicht mehr Wasser entnommen werden darf, als ihm zufliesst. Dies gilt auch für das Tiefengrundwasser. Bisher stand die Nutzung des Tiefengrundwassers primär für die Mineralwasserversorgung und die Thermalbäder zur Verfügung. Künftig sind auch andere Nutzungen denkbar, beispielsweise für die Landwirtschaft während Trockenperioden und für die tiefe Geothermie.

Das nationale Forschungsprogramm NFP 61 (nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz, detaillierte Schlussdokumentationen 2014 und 2015) hat die aktuelle Wassernutzung analysiert und kommt bezüglich Handlungsbedarf und künftigen Nutzungsmöglichkeiten unter anderem zum folgenden Schluss:

Bedingt durch den eingeleiteten Klimawandel werden im 21. Jahrhundert rund 90% der Schweizer Gletscher abschmelzen, bei gleichzeitig ansteigender Schneefallgrenze. Dies hat einschneidende Auswirkungen auf den alpinen Wasserhaushalt, ebenso ändern sich die jahreszeitlichen Abflüsse ins Unterland.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf das oberflächennahe Grundwasser sind relativ gut bekannt (Schürch et al. 2012, Bollinger & Nyffenegger 2012).

Die meteorologisch-klimatische Entwicklung in jüngerer Zeit hat gezeigt, dass in der Schweiz künftig häufiger mit heissen Trockenperioden im Sommer-Herbst zu rechnen ist. 2014 und 2015 waren bezüglich Temperatur globale Rekordjahre, und 2015 war in Mitteleuropa auch bezüglich Trockenheit ein Extremjahr. Weitere europaweite Trockenjahre aus jüngster Zeit (2003, 2011) bestätigen den Trend. Die schweizerische Landwirtschaft benötigt schon heute (2006, kein Trockenjahr) rund 150 Mio. m^3 Wasser allein für Bewässerungszwecke (Freiburghaus 2009).

Im Sommerhalbjahr verstärkt sich während ausgedehnter Trockenperioden der Bedarf an landwirtschaftlichem Brauchwasser massiv. Das zusätzliche Wasser darf während längeren Trockenperioden nur in geringem Umfang oder gar nicht mehr aus den Oberflächengewässern entnommen werden, weil diese dann selber zu wenig Wasser führen. Auch das oberflächennahe Grundwasser kann nicht überall beliebig zur Bewässerung entnommen werden, weil sonst das Trinkwasser oder weitere bestehende Grundwassernutzungen beeinträchtigt würden. Dies bedeutet, dass die schweizerische Landwirtschaft mit dem Klimawandel auch das Tiefengrundwasser als Ressource in Betracht ziehen wird. Die beiden lange anhaltenden Trockenperioden in den Sommerhalbjahren 2003 und 2015 sowie Modellrechnungen geben klare Hinweise auf die künftige Entwicklung. Von Fuhrer (2010, Abb. 11, 12) wurde der Bewässerungs-Bedarf in Trockenjahren für die einzelnen Landwirtschaftsflächen ermittelt. Dieser Bedarf ist auf einer Mehrzahl der Schweizer Landwirtschaftsflächen hoch bis sehr hoch (mehrere hundert bis tausend m^3 Wasser/ha). Angaben zu dieser Problematik machen auch Björnsen Gurung & Stähli 2014, BLW 2011, BAFU 2012a, Fuhrer & Calanca 2014 und Schürch et al. 2012.

Gemäss Prognosen für die Entwicklung der Landwirtschaft in der Schweiz dürfte das Risiko von extrem trockenen Hitzesommern schon beim aktuell angestrebten Klimaziel «maximal + 2 °C» sehr stark ansteigen: auf 40%, d. h. alle 2 bis 3 Jahre folgt ein sehr trockener Hitzesommer (Modellrechnung für Schweizer Mittelland: J. Fuhrer, Forschungsanstalt Agroscope ART, 2013).

Falls die Landwirtschaft als Folge dieser Entwicklung saisonal die Nutzung von Tiefengrundwässern anstrebt, ist sie zwar nicht auf Trinkwasserqualität angewiesen. Jedoch würde stark salzhaltiges Tiefengrundwasser die Böden und das darunter liegende Grundwasser beeinträchtigen.

Das NFP 61 hat die Prämissen und Anforderungen an eine künftige nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz untersucht. Die Schwerpunkte dieses Programms lagen bei den Oberflächengewässern und den Grundwässern im Lockergestein. Die Schlussberichte von NFP 61 (Björnsen Gurung & Stähli 2014, Lanz et al. 2014, Schmid et al. 2014, Leitungsgruppe NFP 61 2015) kommen bezüglich Tiefengrundwasser zusammengefasst zu folgenden generellen Schlussfolgerungen:

Das Tiefengrundwasser stellt eine grosse, jedoch noch wenig bekannte Ressource dar, sowohl für die Trinkwasserbeschaffung als auch für die Landwirtschaft. Mittelfristig sollten geeignete Tiefengrundwässer für Trinkwasserzwecke sowie für die Landwirtschaft identifiziert werden. Dabei ist auch ihr Schutz zu gewährleisten. Das NFP 61 folgert, dass die gesetzlichen Grundlagen bezüglich einer optimalen Wassernutzung verbesserungswürdig sind und dass die derzeitigen politischen Strukturen und Aufgabenteilungen eine optimale Ressourcen-Nutzung der Gewässer behindern.

Die hydrothermale Tiefengeothermie ist in der Schweiz in Entwicklung begriffen und bildet einen neuen Forschungsschwerpunkt. Chancen, Risiken und Konflikte dieser Technologie werden in den beiden folgenden Kapiteln beschrieben.

2 Nutzungspotenziale für das Tiefengrundwasser

2.1 Blick ins Ausland

Vielerorts steht die Erkundung des Tiefengrundwassers noch in der Anfangsphase. Sie ist aber eine Voraussetzung für die Abschätzung von Nutzungspotenzialen und beinhaltet auch interdisziplinäre Forschung (Charminé et al. 2013). Einzelne grossregionale Wasserwirtschaftsbehörden bereiten sich auf die Nutzung von Tiefengrundwasser vor (z. B. dokumentiert in: Wasserwirtschaft Land Steiermark 2011, Bayerisches Landesamt für Umwelt 1995).

Tiefengrundwasser wird zurzeit in den meisten europäischen Ländern als Mineralwasser und als balneologisch genutztes Thermalwasser verwendet (Loveless et al. 2015, Carlé 1975). Die hydrothermale Nutzung von Tiefengrundwasser ist noch jung und hat Ausbaupotenzial. Sie ist im Ausland in geeigneten Regionen stark verbreitet, beispielsweise in Italien, Island, Südbayern, Neuseeland und in den USA, ansatzweise auch im Elsass. Auch Schwellen- oder Entwicklungsländer wie die Philippinen, Indonesien, Kenia, Mexico, El Salvador oder Costa Rica haben diese Energieform in grossem Stil und auch für die Stromproduktion bereits etabliert (Bertani 2010).

In Regionen mit saisonaler Trockenheit wird heute schon in grösserem Ausmass auf Tiefengrundwasser zurückgegriffen, um den Bedarf für Trinkwasser und Brauchwasser decken zu können. Beispiele dafür sind Spanien, Israel und die USA. Vielerorts ist diese Tiefengrundwasser-Nutzung nicht nachhaltig, wie sinkende Grundwasserspiegel und das seitliche Nachfliessen von salzreichen Wässern aufzeigen.

2.2 Realisierte oder geplante Tiefengrundwasser-Nutzungen in der Schweiz

Trinkwasser

Das Trinkwasser aus konventionellen Ressourcen ist in der Schweiz mittelfristig auch in Trockenperioden meistens ausreichend vorhanden, insbesondere durch die Versorgung aus Verbundnetzen. Regional ist aber mit saisonalen Verknappungen zu rechnen. Eine Übersicht zu den mittelfristigen Nutzungsperspektiven geben Hartmann & Meylan (2013). Die längerfristige Möglichkeit einer ergänzenden Nutzung von Tiefengrundwasser wird in Kap. 2.3 behandelt.

Thermalwasser für balneologische Zwecke
Tiefengrundwasser wird in der Schweiz schon seit langem in Thermalbädern genutzt (Högl 1980, Burger 2011, Nussberger et al. 1937). Diese Branche expandiert und hat eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung erlangt, auch als Entwicklungskerne von Tourismusregionen. Die heutige Nutzung konzentriert sich auf alpine Gebiete und den Jura. Der Grund liegt in der tektonischen und topografischen Konstellation der Schweiz, welche eine grossräumige Tiefenwasserzirkulation in diesen beiden Regionen begünstigt (vgl. Gorhan & Griesser 1988, Schmassmann 1990a, Burger & Kozel 2015).
Die hydrogeologische Erforschung der Thermalwässer ist noch sehr lückenhaft, obschon an einzelnen Orten gute Kenntnisse vorliegen, beispielsweise für Lavey-les-Bains und Val d'Illiez (Sonney et al. 2012, Bianchetti et al. 1992, Bianchetti 1994) und für Vals (Hartmann 1998).

Mineralwasser
Auch die als Trinkwasser genutzten Mineralwässer stammen überwiegend aus den Alpen und dem Faltenjura. Die gesamtschweizerische Förderung liegt derzeit (2014) bei 566 Mio. Liter jährlich (Verband Schweizerischer Mineralquellen, SMS). Doppelnutzungen sowohl als Thermalwasser als auch als Mineralwasser sind in der Schweiz etabliert, beispielsweise in Vals, Bad Zurzach, Yverdon-les-Bains und Val d'Illiez. Über Fliesswege und Fliesszeiten der Mineralwässer liegen meist nur wenige Grundlagen vor; gut untersucht sind die Mineralquellen von Vals (Stoll & Wyss 2011, Hartmann 1998).

Hydrothermale Tiefengeothermie
Die hydrothermale Tiefengeothermie ist in der Schweiz seit mehreren Jahren im Fokus der Untergrundnutzung, wie auch die gesamte Geothermie (Imhasly et al. 2015, Siddiqi & Minder 2010). Eine ausschliesslich hydrothermale Energienutzung von Tiefengrundwasser wurde in den letzten Jahren mehrfach versucht, war aber bis auf wenige Ausnahmen, wie z. B. Basel-Riehen, nicht erfolgreich (hydrogeologische Dokumentationen: Projekt St. Gallen-Sittertobel: Näf, 2015; Erkundungsbohrung Zürich-Triemli: Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, 2014). Mehrere Tiefbohrungen wurden nach dem Ausbleiben von genügend Tiefengrundwasser zu tiefen Erdwärmesonden-Bohrungen (TEWS) ausgebaut. Beispiele solcher TEWS mit über 1 km Sondenlänge sind Weissbad AI (1993; 1.2 km), Weggis LU (1994; 2.3 km) und Zürich-Triemli-Sonnengarten (2011; 2.4 km).
In der Schweiz fehlen die hydrogeologischen Vorabklärungen bezüglich Eignung zur hydrothermalen Tiefengeothermie weitgehend; man ist vielerorts auf Ergebnisse angewiesen, welche aus anderweitigen Untersuchungen angefallen sind, wie Nagra-Endlagerprojekte, die Suche nach Kohlenwasserstoffen oder Tunnelbauten mit grosser Überdeckung. Diverse Arbeiten zum generellen Potenzial der tiefen Geothermie wurden von L. Rybach, Zürich, verfasst (theoretische Analyse in Rybach 2015, Perspektiven in Rybach 2010), vgl. auch Hirschberg et al. 2015, Guglielmetti & Schill 2011, Signorelli & Kohl 2006, Baujard et al. 2007, Kohl et al. 2010 sowie Niederberger 2012. Ein ausführliches Beispiel zur Erkundung des Potenzials für hydrothermale Tiefengeothermie im alpinen Raum liefert Guglielmetti (2012).
Gründe für die zurückhaltende Realisierung in der Schweiz sind das hohe Risiko, nicht genug oder nicht genügend warmes Wasser zu finden, Rechtsunsicherheiten (z.B. bezüglich Nutzungsauflagen und Schadensregelung), hohe Unterhaltskosten wie z. B. Pumpenverschleiss und nicht zuletzt die generelle Unsicherheit, ob diese Energieform nicht schon bald durch billigere Energieproduktionen aus dem Markt gedrängt wird (Gränicher 1997, Frischknecht et al. 1996, Bütler 2013, Ferguson 2009). Methodisches zu geothermischen Prognosen liefert Busslinger 1998.
Ob die hydrothermale Tiefengeothermie in der Schweiz eine grössere Bedeutung erlan-

gen kann, wird die nähere Zukunft zeigen. Erste Ergebnisse dazu wird das laufende Forschungsprojekt «Energiewende» (NFP 70) liefern, in welchem technologische Fragestellungen bearbeitet werden. Unter dem Titel «Stromversorgung» wurde auch das Verbundprojekt «Wasserkraft und Geoenergie» lanciert. Im Bereich der tiefen Geothermie umfasst das Projekt geoenergetische Grundlagenforschung mit einem Schwerpunkt auf dem Verstehen der notwendigen Prozesse für Tiefengeothermie und CO_2-Zirkulation sowie Durchlässigkeits- und Stimulationsverfahren bei hohen Temperaturen und Drücken. Das NFP 70 arbeitet eng mit dem Nationalen Forschungsprogramm «Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71) zusammen, welches die Angebots- und Nachfragestrukturen untersucht und auch die sozioökonomischen Aspekte einer Energiewende beleuchtet.

2.3 Nutzungs-Perspektiven

Eine Zusammenstellung der bekannten Tiefengrundwässer in der Schweiz, gegliedert in neun tektonisch definierte Zonen, findet sich in Waber et al. 2015 (Tab. 1, Fig. 1). Darin sind auch deren wichtigste Eigenschaften aufgeführt, soweit bekannt. Daraus lassen sich generelle Nutzungs-Perspektiven für einzelne regionale Tiefengrundwässer ableiten. Aufgezeigt wird nicht nur, dass die Schweiz eine grosse Vielfalt an Tiefengrundwässern hat, sondern auch, dass die Erforschung dieser Wässer noch grosse Lücken aufweist.
Die Eignung von unterschiedlich stark mineralisierten Wässern für bestimmte Nutzungsarten wird in Tab. 1 dargestellt.

Die Nutzungsperspektiven der **hydrothermalen Tiefengeothermie** sind derzeit unsicher und wurden im vorangehenden Kapitel behandelt. Eine nachhaltige Nutzung bedingt die Rückführung des abgekühlten Wassers in den Entnahme-Aquifer. Zu «Nebenwirkungen» der Tiefengeothermie allgemein äussern sich Burri & Meier 2011 sowie Ziegler 2013.
Die Nutzungsperspektiven für **Trinkwasser** sind positiv. Zu erwarten ist ein weiterhin steigender Bedarf für die Mineralwasserförderung (Flaschenabfüllung). Längerfristig ist auch die vermehrte Einspeisung von Tiefengrundwasser ins Netz eine Option. Als Beispiel dient die Gemeinde Seon AG (Matousek & Graf 1998). Vorausschauend sollte das qualitativ beste Tiefengrundwasser für Trinkwasserzwecke reserviert werden,

< 2 g/l, gering mineralisiert, Trinkwasser-Qualität (TQ)	2-5 g/l mässig mineralisiert, TQ oder «Brauchwasser»	5-30 g/l stark mineralisiert, «salzig»	3-5% Salzgehalt Salzwasser	> 5% Salzgehalt Salzsole «Brine»	Nutzungsart
+++	+++	++	+ / ø	ø	Hydrothermale Geothermie
+++ / ++	+++	+++	++	+	Thermalbäder
+++	++ / +	+	ø	+ / ø	Brauchwasser für Industrie
+++	++	+ / ø	ø	ø	Brauchwasser Landwirtschaft
+++	++ / +	ø	ø	ø	Mineralwasser

Generelle Beurteilung | general evaluation: +++ = gut geeignet | ideal suitable, ++ = geeignet | suitable, + = bedingt geeignet | conditionally suitable, ø = ungeeignet | unsuitable

Tab. 1: «Tiefenwasserqualität» und «Nutzungsmöglichkeiten».
Tab. 1: «Deep water quality» and «usage options».

zumindest in potenziellen Wassermangel-Gebieten wie dem Jura. Tiefengrundwasser hat auch den Vorteil, dass es in der Regel frei ist von künstlichen Mikroverunreinigungen.
Die Nutzungsperspektiven für **Thermalwasser zu balneologischen Zwecken** sind ebenfalls positiv. Der Ausbau zu grossen Wellnesskomplexen dürfte weitergehen. Grosse Thermal- oder Wellness-Bäder wie Lavey-les-Bains, Yverdon, Leukerbad, Brigerbad, Bad Schinznach, Baden-Ennetbaden, Bad Ragaz, Scuol-Tarasp und Bad Zurzach stehen unter kompetitivem Wachstumsdruck in einem expandierenden Markt.
Die Nutzungsperspektiven für die **Landwirtschaft** sind heute noch unklar. Eine Prognose für das Jahr 2050 beziffert den Rückgang der Niederschläge in der Schweiz im Sommer auf rund 20% (Gander et al. 2009). Gemäss dieser Prognose wird dann wegen der höheren Temperaturen die Evapotranspiration von Mai bis August höher sein als die Niederschlagsmenge, was zu einer Austrocknung der Böden führt. Wie in Kap. 1.2 ausgeführt, steht die Landwirtschaft in vielen Gebieten der Schweiz mittelfristig vor der Herausforderung, entweder ihr Produkte-Angebot an längere Trockenperioden im Sommer-Herbst und trockene Böden anzupassen oder auf geeignetes Tiefengrundwasser zur Bewässerung zurückzugreifen. Das NFP 61 kommt in seinem Synthesebericht 1 (Björnsen Gurung & Stähli 2014) zum Schluss, dass künftig in einzelnen Regionen der Schweiz eine angespannte Bewässerungs-Situation in der Landwirtschaft eintreten wird, welche lokal nicht mit den üblichen Ressourcen (Lockergesteinsgrundwasser und Oberflächengewässer) behoben werden kann. Erste Vorabklärungen dazu haben begonnen (BLW 2011, BAFU 2012b, Fuhrer et al. 2013).
Ein noch unbedeutender, ausbaufähiger Produktionszweig in der Schweiz ist die Fischproduktion in Aquakulturen. Diese hätte auch für warmes und stärker salzhaltiges Tiefengrundwasser Verwendung, wie das Beispiel Störproduktion mit Tiefengrundwasser aus dem Lötschberg-Basistunnel zeigt. Auch andere tiefe Tunnelwässer kämen dafür in Frage (Bucher et al. 2012).

3 Nutzungskonflikte und mögliche Bewältigungs-Strategien

3.1 Konflikte durch gleichartige Nachbarnutzungen

Tiefengrundwasser für Trinkwasserzwecke (inklusive Mineralwasser)
Die Anzahl der natürlich austretenden oder artesisch aus Bohrungen kommenden Tiefengrundwässer sind in der Fläche zwar noch «dünn gesät», sie werden jedoch ergänzt durch Bohrungen zur Produktionssteigerung und durch neue Projekte mit reiner Bohrerschliessung (Beispiel: das Brauwasser für «Feldschlösschen» kommt aus Fels-Bohrungen in den Muschelkalk). Der Vorteil solcher Trinkwasser-Erschliessungen liegt bei einer konstanten und guten Wasserqualität.
Mit zunehmender Dichte von Entnahmestellen wird unklar, wer durch seine Förderung benachbarte Nutzer beeinträchtigt und wenn ja, in welchem Ausmass. In der Regel sind die Nutzungsrechte in befristeten oder ehehaften Konzessionen begründet. Diese fundieren jedoch nicht immer auf hydrogeologischen Erkenntnissen und gehen selten auf mögliche Übernutzungsprobleme ein. Wird ein Tiefengrundwasser-Aquifer von mehreren Konzessionären genutzt, so können sie sich durch Übernutzung gegenseitig die Förderkosten hochtreiben sowie Tiefengrundwasser anderer Qualität aus benachbarten Aquiferen mobilisieren.

Tiefengrundwasser für Badewasserzwecke
Analog zur Mineralwassernutzung / Trinkwassernutzung kann auch die intensive Thermalwasserförderung zu einer quantitativen Übernutzung führen. In Bad Schinznach beispielsweise kommt der Optimierungsprozess bereits nahe an die Grenzen der Nachhaltigkeit.

Folgen einer Übernutzung sind neben höheren Förderkosten auch eine mögliche Temperaturabsenkung und eine Änderung des Wasserchemismus. Einmal etablierte Intensivnutzungen und Übernutzungen sind schwierig wieder auf ein nachhaltiges Niveau rückführbar, weil mit der Bäder-/ Wellness-Nutzung hohe Investitionen verbunden sind und die Konzession ein starkes Rechtsmittel zum Weiterbetrieb auch bei einer Übernutzung darstellt.

Tiefengrundwasser für Brauchwasserzwecke
Tiefengrundwasser mit geringer bis mittlerer Mineralisation (vgl. Fig. 1) kann in der Regel als Brauchwasser verwendet werden. Dadurch wird einem Aquifer Wasser entzogen, welcher eventuell bereits anderweitig genutzt wird, z. B. als Trinkwasser oder als Thermalwasser (balneologisch oder geothermisch). Dies kann zu erheblichen Nutzungskonflikten führen. Eine Brauchwassernutzung aus dem Felsgrundwasser ohne Rückführung verändert schon nach kurzer Zeit die lokalen Tiefengrundwasserverhältnisse erheblich, verlässliche Prognosen und Modellierungen dazu sind jedoch schwierig (Toth 2009, Ingebritsen et al. 2006).

Energetische Nutzung von Tiefengrundwasser (hydrothermale Geothermie)
Schon die heute weit verbreitete untiefe Geothermie (bis ca. 400 m) kann zu Veränderungen der hydrogeologischen Ausgangslage führen. Insbesondere Kurzschlüsse in oberflächennahen Grundwasserstockwerken, Anbohren von Artesern und Subartesern sowie Mängel durch unsorgfältig ausgeführte Hinterfüllungen erzeugen Grundwasserschäden (Butscher et al. 2011). Die selben Probleme können in der tiefen Geothermie auftreten. Bei einer nachhaltigen hydrothermalen Nutzung muss das abgekühlte Wasser wieder in den Aquifer zurückgeführt werden. Dadurch beschränkt sich der Eingriff im Wesentlichen auf eine Temperaturabsenkung, die Ausgasung und allenfalls eine Ausfällung von gelösten Substanzen im Aquifer.

Kaskaden-Nutzungen
Viele Tiefengrundwässer eignen sich für eine Zweit- oder Mehrfachnutzung. Dadurch erhöht sich der gesamtwirtschaftliche Nutzwert und damit auch die Akzeptanz eines Eingriffs. Beispiel: Nutzung eines Tiefengrundwassers für Mineral- oder Badewasser plus thermische Nutzung zu Heizzwecken.
In Nordost-Deutschland wird geprüft, ob auf Tiefen unterhalb eines Kilometers (paläozoische Sedimente) auch eine Doppelnutzung als Tiefen-Hydrothermie und gleichzeitig als CO_2-Einlagerung in dieselben salinen Aquifere möglich sei. Modellierungen zeigten, dass das abgekühlte und mit CO_2 angereicherte Thermalwasser mehr als 20 Jahre braucht, um die Förderbohrung im gleichen Aquifer zu erreichen, wenn diese mehr als 7 km von der Rückführbohrung entfernt ist (Tillner et al. 2012). Dazu wurde auch die grossräumige Grundwasserdynamik untersucht (Jahnke et al. 2012), insbesondere ob bei dieser Doppelnutzung salzreiche Tiefengrundwässer entlang von Störungszonen durch die mesozoischen Schichten hindurch in salzarme Grundwässer aufsteigen können.

3.2 Konflikte durch unterschiedliche Nutzungsarten, Konfliktmanagement

Insbesondere in dicht besiedelten Räumen kann es zu Konflikten zwischen unterschiedlichen Nutzungen desselben Tiefengrundwasser-Aquifers kommen. Heute gilt die gewohnheitsrechtliche Regel, dass ein Erstnutzer durch eine bestehende Konzession / Bewilligung / Erlaubnis gegenüber später hinzutretenden Nutzern («Nachnutzer») privilegiert wird. In bereits genutzten Tiefengrundwasser-Arealen kann so eine weitere Nutzung begrenzt oder blockiert werden.
Das Konfliktpotenzial wird deutlich eingeschränkt, wenn der Regal-Inhaber / Regulator unterschiedliche Arten von Tiefengrundwassernutzungen priorisieren darf. Dazu braucht es jedoch eine gesetzliche Grundlage. Der Gesetzgeber wird in einem solchen Fall darauf achten, dass einzelne Tiefen-

grundwässer so genutzt werden, dass deren natürliche Qualitäten und Nachteile (Mineralgehalt, Temperatur, pH-Wert, Salzgehalt, Reservoirgrösse, Regenerationsrate, Betonaggressivität) bei einer Nutzungsvergabe möglichst optimal berücksichtigt werden. Die Nutzungs-Priorisierung ist auch ein Instrument des Konfliktmanagements, dieses muss aber in der Schweiz noch entwickelt werden.

Konfliktpotenzial bei Nutzungen ohne Priorisierungsmöglichkeit
Dies ist heute die Normalität in der Schweiz. Mit jeder Nutzung wird so die Möglichkeit von weiteren Nutzungen des gleichen Tiefengrundwassers eingeschränkt, unabhängig davon, ob eine neu geplante Nutzung ökonomisch interessanter, ökologisch sinnvoller, planerisch wertvoller ist oder nicht. Dies kann dazu führen, dass z. B. ein für Trinkwasserzwecke geeignetes Tiefengrundwasser als Brauchwasser «verbraucht» oder lediglich geothermisch genutzt und dabei möglicherweise qualitativ beeinträchtigt wird. Die fehlende Priorisierung schränkt zudem die Planungs- und Investitions-Sicherheit für alle Beteiligten ein.

Konfliktpotenzial bei nutzungsoptimierter Priorisierung
Eine Priorisierung nach optimierten Nutzungsmöglichkeiten bringt Vorteile wie bessere Rechts- und Investitions-Sicherheit, bessere Planbarkeit, grössere Nachhaltigkeit und einen besseren gesamtwirtschaftlichen Nutzen. Sie setzt aber voraus, dass

a. ein entsprechender Rechtsrahmen vorhanden ist,
b. die Tiefengrundwässer in ihrer räumlichen Lage und Qualität untersucht werden, und
c. die Nutzungs-Priorisierung planerisch konkretisiert und nachvollziehbar umgesetzt wird.

Eine nutzungsoptimierte Priorisierung ist umso wirksamer, je früher sie durchgeführt wird, weil sie neben den künftigen auch bereits bestehende Nutzungen (altrechtlich) berücksichtigen muss. Wie stark die einzelnen Nutzungsarten gewichtet werden, ist sowohl eine ökologische als auch eine ökonomische und politische Frage.
Eine Priorisierung von Tiefengrundwasser-Nutzungen ist abhängig vom qualitativen und quantitativen Potenzial des Vorkommens und kann Rücksicht auf die regionalen Nutzungsbedürfnisse nehmen. Es können auch Planungsgebiete für den Untergrund ausgeschieden werden, in denen eine bestimmte Nutzungsart oder eine Nutzungskombination höher priorisiert wird als im weiteren Umland.
Das Konfliktpotenzial, wie hier beschrieben, verschwindet nicht durch eine nutzungsorientierte Priorisierung, aber die Planungs-, Rechts- und Investitionssicherheit ist auf einem höheren Niveau, der ökonomische Nutzen wird optimiert und die Bewilligungsverfahren werden vereinfacht und beschleunigt.

Wer priorisiert unterschiedliche Nutzungen?
Die drei oben genannten Bedingungen für eine Nutzungs-Priorisierung sind in der Schweiz zurzeit nicht erfüllt. An den drei Voraussetzungen könnte parallel gearbeitet werden, wobei die Untersuchung der Tiefengrundwässer in ihrer räumlichen Lage und Qualität anspruchsvoll und kostenintensiv ist und gemäss früheren Erfahrungen auch viel Zeit beansprucht (NEFF 1980, Gränicher 1997). Auch die Schaffung des Rechtsrahmens und der Planungsinstrumente für eine nutzungsorientierte Priorisierung ist anspruchsvoll. Diese sollten nicht erst entwickelt werden, wenn Konflikte ausgebrochen sind und Projekte durch Gerichtsverfahren blockiert werden. Die Priorisierungsaufgabe ist, was den Gewässerschutz anbelangt, eine Verbundaufgabe von Bund und Kantonen, wobei sich die Kantone als Inhaber der Grundwässer planerische Freiräume sichern werden. Die betroffenen Nutzerbranchen sollten von Anfang an in eine Priorisie-

rung eingebunden werden (vgl. Diskussion in Kap. 5).

3.3 Konflikte zwischen Tiefengrundwassernutzung und anderen Untergrundnutzungen

Eine Untergrundnutzung kann auch dann in Konflikt geraten mit der Tiefengrundwassernutzung, wenn sie selber gar kein Wasser nutzt. Beispiele dafür sind:

Petrothermale Geothermie
Mit dem Durchbohren von Tiefengrundwasser-Aquiferen, welche oberhalb des Zielhorizonts für petrothermale Geothermie liegen, kann Grundwasser beeinträchtigt werden. Dies wird in der Regel auf unsorgfältiges Arbeiten zurückgeführt, Grundwasserschäden können jedoch auch bei sorgfältigem Arbeiten auftreten. Wird zusätzlich noch gefract, so braucht es zu den wichtigen Tiefengrundwasser-Aquiferen Sicherheitsabstände. Diese wurden in der Schweiz noch nicht bestimmt, während sich in einzelnen Nachbarländern eine sorgfältige Fracking-Praxis etabliert hat (Beispiel Deutschland: Liermann 2014).

Raumgreifende Untertagebauten und tiefliegende Infrastrukturbauten
In den nächsten Jahrzehnten ist mit der Erstellung von Untertagebauten zu rechnen, welche teilweise das Potenzial einer Beeinträchtigung der Tiefengrundwasser-Kreisläufe haben. Neben raumgreifenden Bauwerken wie Untertagedeponien können auch tiefliegende Verkehrs- und Kommunikations-Anlagen Eingriffe verursachen, z. B. bei der Querung nebeneinander liegender Aquifere oder durch dauerhafte Drainage. Bisher wurden dazu einzelfallweise Bauvorschriften erlassen, beispielsweise über die maximal zulässige Entwässerungswirkung der NEAT-Tunnels. Zudem steht die (etwas angejahrte) Wegleitung des BAFU zum Gewässerschutz bei Untertagebauten zur Verfügung. Die Koordination zwischen der Raumplanung im Untergrund und dem Schutz des Tiefengrundwassers ist in der Gesetzgebung noch nicht umgesetzt.

Endlagerung von CO_2
Die Hochdruck-Verpressung von flüssigem CO_2 in den tiefen Untergrund ist in der Schweiz dann eine wirtschaftliche Option, wenn wirksame Klimagas-Vorschriften in Kraft treten werden. Aus ökonomischen Gründen werden Einlagerungsstandorte im Vordergrund stehen, welche nahe bei Grossemittenten liegen, z. B. Zementwerke. In Chevalier et al. 2010 sowie in Fabbri et al. 2014 wird dargelegt, dass das schweizerische Molassebecken und eventuell auch der Faltenjura stellenweise für die CO_2-Sequestrierung geeignet sein könnten.
Das in Kap. 2.2 beschriebene Forschungsprogramm NFP 70 umfasst im Verbundprojekt *Wasserkraft und Geoenergie* auch die Fragestellung: «Ist die unterirdische CO_2-Sequestrierung ein gangbarer Weg für die Ermöglichung einer kohlenstofffreien Stromerzeugung?». Ergebnisse sind noch nicht bekannt.
Als Einlagerungsmedium für CO_2 eignen sich primär poröse oder stark zerklüftete Gesteine in wenigen Kilometern Tiefe, also die Tiefengrundwasser-Aquifere. Die Verpressung von Gasen und Fluiden ist im Grundsatz technologisch entwickelt und z. B. in Norwegen in Erprobung. Über Langzeitauswirkungen wie die Störung der Tiefengrundwasser-Kreisläufe, CO_2-Leckagen oder die Veränderung von Wasserchemismus und Fällungsreaktionen liegen allerdings noch keine verlässlichen Daten vor. Eine Übersicht dazu gibt Kharka et al. 2006.
CO_2 kann zwar in flüssiger Phase mit hohem Druck in den Untergrund eingepresst werden, aber auf Einlagerungstiefe geht es wegen der dort herrschenden P-T-Bedingungen in einen überkritischen Aggregatszustand über: mit einer Dichte von 400–700 kg/m^3 besitzt es die Dichte einer Flüssigkeit, ist aber so mobil (Viskosität) wie ein Gas. Der überkritische Zustand wird

schon oberhalb der Werte P = 74 bar und T = 31 °C erreicht, also schon in deutlich weniger als einem km Tiefe. Wie mobil CO_2 in grösserer Tiefe ist, zeigen auch die zahlreichen «kalten» Mineralwasser- und Badequellen des Engadins, welche hohe Mengen von aus grosser Tiefe aufsteigendem CO_2 führen (Bissig et al. 2006). Die CO_2-Verpressung führt zudem im Tiefengrundwasser zu Wasserverdrängungen in benachbarte Aquifere und/oder zur Erhöhung des Systemdrucks. Die CO_2-Einlagerung ändert auch den pH-Wert und damit generell die Reaktionsfähigkeit des Wassers und die Löslichkeitsbedingungen gegenüber dem Wirtgestein. Überkritisches CO_2 ist zudem ein hervorragendes Lösungsmittel, was die chemische Zusammensetzung des Tiefengrundwassers zusätzlich verändern kann.
Die rechtlichen Grundlagen zur CO_2-Abscheidung und Ablagerung (CAA) im europäischen Energie-Umweltrecht beschreibt Dietrich (2007). Darin sind auch die technischen Verfahren zu Abscheidung, Transport, Verpressung und Einlagerung beschrieben, sowie die Themen «Bergrecht und CO_2-Verpressung» und «Wasserrecht und CO_2-Verpressung» bearbeitet.

Förderung von Kohlenwasserstoffen
Dies ist in der Schweiz kein aktuelles Thema, obwohl schon viel Explorationsarbeit erfolgte. Es bestehen weiterhin mehrere Explorations-Konzessionen, die Untersuchungen halten sich aber seit vielen Jahren in engen Grenzen (Bohrung Noville VD als Ausnahme). Klar ist aber, dass auch die Schweiz grössere Kohlenwasserstoff-Vorkommen hat: neben Erdgas insbesondere ausgedehnte, in der Regel tiefliegende Kohlevorkommen in den Permokarbon-Trögen, welche auch ein gewisses Potenzial zur Gasförderung haben. Sollte es zu einem Abbau von Kohlenwasserstoffen kommen, so ist das Konfliktpotenzial zur Nutzung benachbarter oder darüber liegender Tiefengrundwässer zu beachten.

Kollateralschäden infolge Druckänderung in den Untergrund-Fluiden
Eingriffe in den tiefen Untergrund ändern oft die Druckverhältnisse im Tiefengrundwasser, in deren freier Gasphase und generell in den Fluiden. Dabei kann es sowohl zu massiven Druck-Erhöhungen als auch zu Absenkungen kommen (z. B. bei der Förderung von Tiefengrundwasser oder von Erdgas). Solche Druckänderungen können Erdbeben mit Schadenpotenzial auslösen, und zwar nicht nur bei einer Erhöhung, sondern auch bei einer Absenkung des Druckes (nachgewiesen bei konventioneller Gasförderung in Norddeutschland mittels detaillierter Herdtiefen-Analysen, beispielsweise 2004 in der Stadt Rotenburg in Niedersachsen). Neben Erdbebenschäden an der Oberfläche sind durch Druckänderungen weitere Schäden in der Tiefe möglich, insbesondere durch das Öffnen neuer Verbindungen zwischen Tiefengrundwasser-Aquiferen sowie durch Verdrängen bzw. Anziehen von Tiefengrundwasser in bzw. aus Nachbargebieten, mit entsprechenden Folgen für bereits bestehende Nutzungen.

Wer koordiniert und priorisiert die Tiefengrundwassernutzung mit anderen Untergrund-Nutzungen?
In der Schweiz gibt es weder einen spezialgesetzlichen Rahmen noch konkrete Verfahrensabläufe zur Konfliktbewältigung im Bereich Tiefengrundwasser-Nutzung / übrige Untergrundnutzung. Ein erster Ansatz dazu könnte die neue Vollzugshilfe des Bundes zur Abstimmung wasserwirtschaftlicher Vorhaben sein, welche jedoch nicht für Tiefengrundwässer konzipiert wurde (Kap. 4). Der Bund hat zudem eine Empfehlung zur Erarbeitung kantonaler Schutz- und Nutzungs-Strategien herausgegeben (UVEK 2011, gemeinsam von BAFU, BFE und ARE verfasst). Da der Gewässerschutz eine Verbundaufgabe Bund-Kantone ist, dürfte auch diese Aufgabe gemeinsam anzugehen sein.

4 Schutz der Tiefengrundwässer

4.1 Heutige Situation

Der Schutz von nutzbarem Tiefengrundwasser ist in der Schweiz durch die Gesetzgebung (Gewässerschutz-Gesetz GSchG und Gewässerschutz-Verordnung GSchV) zwar abgedeckt, allerdings bestehen im Vergleich zum Schutz der Oberflächengewässer und des Lockergesteins-Grundwassers grössere Unklarheiten. Das Gesetz unterscheidet nicht zwischen verschiedenartig nutzbaren (Tiefen-) Grundwässern, dem entsprechend gibt es auch keine Differenzierung für deren Schutzwürdigkeit. Bezüglich Trinkwassernutzung ist die Nutzbarkeit vom Bund auf Verordnungsstufe geregelt, während für andere Nutzungen wie Thermal- / Badewasser, Brauchwasser oder die hydrothermale Tiefengeothermie keine oder nur sehr vage Schutzbestimmungen vorliegen. Die Kantone können für genutztes Tiefengrundwasser eigenverantwortlich «Schutzzonen» bzw. Nutzungspläne ausscheiden, z. B. für Thermalwasser. Hierzu ist die Rechtsgrundlage jedoch in den meisten Kantonen schmal.
Der Vollzug ist hingegen klarer geregelt: Die Kantone vollziehen das GSchG und die GSchV sowie das USG im Rahmen ihrer Tätigkeiten als Bewilligungs-, Konzessions-, Planungs- und Aufsichtsbehörde. Der Bund vollzieht diese Gesetze nur, wenn er für ein Vorhaben direkt zuständig ist. Für einen einheitlichen Vollzug beim Tiefengrundwasser fehlen somit weitgehend die Grundlagen und Ausführungsbestimmungen.
Zur Koordination von wasserwirtschaftlichen Vorhaben hat das BAFU 2013 eine Vollzugshilfe publiziert (*«Die Abstimmung wasserwirtschaftlicher Vorhaben in und zwischen den Bereichen, den Staatsebenen und im Einzugsgebiet»*). Das Tiefengrundwasser wird darin nicht erwähnt, könnte aber je nach Wasserqualität zu einem Anwendungsbereich werden, da auch die Trink- und Brauchwasser-Versorgung, der Grundwasserschutz und die Bewässerung in die Vollzugshilfe mit integriert wurden. Erfahrungen zu dieser Vollzugshilfe könnten in einigen Jahren ausgewertet werden.

4.2 Gewässerschutz als Verbundaufgabe Bund-Kantone

Der Gewässerschutz ist eine von 17 Verbundaufgaben, für welche Bund und Kantone gemeinsam zuständig sind. Dies bedeutet, dass Bund und Kantone auch beim Schutz der Tiefengrundwässer zusammenarbeiten und gemeinsam eine Vollzugsordnung entwickeln. Dabei stellen sich insbesondere folgende Fragen: Wird das für Trinkwasserzwecke geeignete Tiefengrundwasser vor einer Beeinträchtigung durch andere Nutzungen ausreichend geschützt, und wenn ja: wie? Braucht auch das Tiefengrundwasser, welches sich nicht für Trinkwasserzwecke eignet, für andere Nutzungen ergänzende Schutzbestimmungen? Wie kann eine gesetzliche Grundlage für qualitätsbezogene Nutzungs-Priorisierungen geschaffen werden? Wie werden die Raumplanung im Untergrund und der Grundwasserschutz miteinander koordiniert?

Bundesgesetzgebung
Das GSchG stellt in Art. 2 fest: *Dieses Gesetz gilt für alle ober- und unterirdischen Gewässer*, demnach auch für die Tiefengrundwässer. Eine Differenzierung der Grundwässer nach Nutzungsmöglichkeiten und Nutzungseignung (ausser für Trinkwassernutzungen) wird aber nicht vorgenommen.
Folgende Präzisierungen wären für den *Vollzug einer Tiefengrundwasser-Bewirtschaftung* wertvoll:

- Art. 4 GSchG (Begriffe): hier könnte der Bund ergänzend differenzieren zwischen verschiedenen Grundwasserqualitäten, deren Nutzungen und deren Schutzwürdigkeit.
- GSchV: darin ist die Umsetzung von Art. 9 des GSchG nicht konkret geregelt, z. B.

Abs. 1 Definition der Wasserqualität für einzelne Nutzungs-Eignungen; Abs. 2 Vorschriften über Bst. a, b, c (von Art. 9 des GSchG).

- Beurteilungsgrundlagen schaffen bezüglich «Einwirkungen» auf Tiefengrundwasser gemäss Art. 8 Umweltschutzgesetz.
- Raumplanungsgesetz (RPG): Der Untergrund als nutzbarer Raum wird im RPG nicht explizit erwähnt. Damit wird auch die Nutzung von Tiefengrundwasser raumplanerisch (noch) nicht erfasst. Eine entsprechende Aufnahme ins Gesetz und in die dazugehörende Verordnung würde die Schaffung von besseren Planungsgrundlagen erleichtern. Darin könnte auch eine Bestimmung verankert werden, welche den Kantonen die Möglichkeit gibt, die Nutzungsarten für Tiefengrundwasser gebietsbezogen zu priorisieren. Alternativ könnte eine solche Bestimmung auch ins Gewässerschutz-Gesetz aufgenommen werden.

Kantonale Regalrechte, Nutzungsplanungen und ergänzende Schutzbestimmungen

Die Hoheit über die Gewässer und deren Nutzung liegt bei den Kantonen. Werden Schutz und Nutzung der Tiefengrundwässer auf Bundesebene im Rahmen der Verbundaufgabe «Gewässerschutz» nicht weiter konkretisiert, entsteht durch den Vollzugsfreiraum zwischen einzelnen Kantonen allmählich eine ganz unterschiedliche Vollzugspraxis. Dies betrifft insbesondere Bewilligungen, Auflagen, Einschränkungen, Kontrollen und Schadensregelungen für die Nutzung der Tiefengrundwässer.

Länderübergreifender Schutz des Tiefengrundwassers

Grundsätzlich ist bei grossen Vorhaben mit länderübergreifenden Umweltauswirkungen eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) gemäss der Espoo-Konvention durchzuführen. Zusätzlich greift bei diesen Vorhaben auch die Aarhus-Konvention (Zugang zu Umweltinformationen, Öffentlichkeitsbeteiligung am Entscheidungsverfahren, Zugang zu Gerichten in Umweltangelegenheiten). Ein Beispiel ist die Nutzung von länderübergreifenden Thermalwasserkörpern. Wenn jedoch die Gesetzgebung bezüglich Nutzung, Schutz und Überwachung von Tiefengrundwasser unklar, lückenhaft und über die Landesgrenze hinweg unterschiedlich ist, hilft auch eine UVP nicht weiter und kann einen Rechtsstreit provozieren.

In der EU gilt die «Europäische Wasserrahmenrichtlinie» (EG-Richtlinie 2000/60/EG) [WRRL]; sie legt einen europaweiten Gemeinschaftsrahmen für den Schutz und die Bewirtschaftung des Wassers fest und ist Leitlinie im Bereich der Wasserpolitik. Die WRRL strebt einen integrierten Gewässerschutz an (Europäische Kommission, Generaldirektion Umwelt, 2014). Ein gutes Beispiel für die länderübergreifend-kooperative Nutzung von Tiefengrundwasser und dessen Schutz ist das Pannonische Becken, wo Ungarn, die Slowakei, Österreich und Slowenien zusammenarbeiten (Szocs et al. 2015). Die WRRL verlangt die Abgrenzung und Beschreibung aller Grundwasserkörper, auch der Tiefengrundwässer.

4.3 Unklarheiten bei der heutigen Regelung des Schutzes von Tiefengrundwässern

Die Kantone haben zwar die Möglichkeit, hier ergänzend und eigenverantwortlich einzugreifen, was jedoch zu föderativem Wildwuchs führen würde. Zudem sind kleinräumig wirksame Regelungen für die grossräumigen und die Kantonsgrenzen überschreitenden Tiefengrundwässer wenig sinnvoll, insbesondere so lange deren räumliche Lage und Fliessbewegung nicht besser bekannt sind.

Neben Ergänzungen auf Gesetzes- und Verordnungsstufe wären auch Richtlinien, Wegleitungen und Vollzugshilfen des Bundes zur Nutzung und zum Schutz der Tiefengrundwässer hilfreich. Diese bestehen zum Teil bereits für Grundwasser allgemein (z. B. BUWAL 1998, BUWAL 2004 und BAFU 2009),

müssten aber bezüglich Tiefengrundwasser aktualisiert werden.
Auf Stufe Kanton können, nachdem auf Bundesebene die gesetzlichen Präzisierungen und Vollzugshilfen zum Tiefengrundwasser ausgearbeitet worden sind, Ergänzungen bei den Wassernutzungs-Bestimmungen und bei der Richtplanung sowie den kantonalen Nutzungsplänen (z. B. für Thermalwasserzonen) vorgenommen werden.

4.4 Nachteile von unklaren und ergebnisoffenen Regulierungen

Sicht der Investoren
Die Investoren von Untergrund-Aktivitäten, sei es zur Nutzung von Tiefengrundwasser oder anderer Vorhaben, wünschen sich möglichst «schlanke» Vorgaben und Regulierungen. Bestehen jedoch Unklarheiten und Unsicherheiten für die Bereiche Nutzung, Schutz, Überwachung, Risiken, Konflikte, Verantwortlichkeiten und Schadensregelung, werden die schlanken Vorgaben schnell zum Bumerang und wirken auf den Investor abschreckend, ebenso für Versicherungen, welche die Risiken abdecken sollen. Wenn die mangelnde Rechtssicherheit erst durch ein Gerichtsverfahren geklärt werden kann (Einsprachen, Beschwerden oder Schadenersatzforderungen), wirkt dies lähmend.

Mangelhafte Beurteilungsgrundlagen für die Bewilligung von Explorationen und die Konzessionierung von Nutzungen
Behörden benötigen ausreichende Beurteilungsgrundlagen, um die Exploration und die Nutzung von Tiefengrundwasser bewilligen zu können. Dies betrifft einerseits die ungefähre räumliche Lage und Beschaffenheit der einzelnen Aquifere (Ressourcen-Kenntnis) und anderseits klare gesetzliche Vorgaben und Vollzugshilfen für die Bewilligung und den Betrieb einer Nutzung.

Fig. 1: Tiefengrundwasser-Aufstoss in der Tamina-Schlucht (Pfäfers / Bad Ragaz SG): Fluss, angereichert mit Thermalwasser (grosses Bild); Quellaustritt des Thermalwassers (kleines Bild). Fotos: H. Burger.

Fig. 1: Deep groundwater upwelling in the Tamina Gorge (Pfäfers / Bad Ragaz SG): river, enriched with thermal water (big picture); Thermal water source (inset). Photos: H. Burger.

Einschränkung der Freiheitsgrade für Investoren und Eigentümer durch mangelnde Regulierung
Die Tiefengrundwässer sind zwar räumlich sehr ausgedehnt, bezüglich einer bestimmten lokalen Nutzung aber auch begrenzt und empfindlich auf Einwirkungen durch Nachbarnutzungen. Steigt die Nutzungsdichte in einem Gebiet an, werden die Freiheitsgrade für künftige Nutzungen zunehmend eingeschränkt. Bei fehlender Nutzungsplanung und insbesondere bei fehlender Nutzungs-Priorisierung nehmen die Wahlmöglichkeiten für künftige Nutzungen stärker ab, als wenn diese Instrumente vorhanden sind.

Fazit
Mit einer sachgerechten Regulierung (Ergänzung des Rechtsrahmens) und insbesondere mit einer wertebasierten und auf regionale Bedürfnisse abgestimmten Nutzungs-Priorisierung entsteht mehr Rechtssicherheit und Investitionssicherheit. Zudem gewinnen sowohl Investoren als auch Behörden Freiheitsgrade für künftige Nutzungen. Dadurch ist im selben Untergrund-Raum eine höhere Nutzungsdichte realisierbar. Voraussetzung ist allerdings, dass die Ressourcen-Kenntnis durch hydrogeologische Untersuchungen einen minimalen Standard erreicht.

5 Braucht es neue Instrumente für eine Regelung der Tiefengrundwasser-Nutzung?

5.1 Gesetzgebung

In Waber et al. 2015 wurde eine Diskussion über die Anpassung der rechtlichen Grundlagen zum Schutz und zur Nutzung von Tiefengrundwässern angeregt. Ebenso enthalten die Berichte der Eidgenössischen Geologischen Fachkommission EGK zur Untergrundnutzung (2013, 2014) sowie die Schlussberichte zum NFP 61 (2014, 2015) Empfehlungen zur Aktualisierung der Gesetzgebung an die neuen technologischen Möglichkeiten im Untergrund, insbesondere für die Nutzung der Tiefengrundwässer.
In Kap. 4.2 werden Gesetzesergänzungen zur Ausarbeitung empfohlen. Die neue gesetzliche Regelung sollte auch mit einschliessen, dass bei Erkundungs- und Bauvorhaben im tiefen Untergrund hydrogeologische Daten in ausreichendem Umfang erhoben und zugänglich gemacht werden.

5.2 Beurteilungs- und Entscheidungshilfen

Zur Beurteilung von Nutzungsvorhaben für Tiefengrundwässer sollten Entscheidungshilfen (Richtlinien, Wegleitungen, Vollzugshilfen) verfügbar sein. Die Erarbeitung solcher bzw. die Aktualisierung bestehender Unterlagen ist auch eine Verbundaufgabe Bund – Kantone zur Umsetzung des Gewässerschutzgesetzes. Vorteilhaft bei der Erarbeitung dieser Grundlagen wäre somit eine Zusammenarbeit Bund – Kantone – Nutzerbranchen – Forschungsanstalten und Fachgesellschaften.

5.3 Wer wartet auf wen?

Bezüglich der Nutzung von Tiefengrundwasser, wie generell bei der Nutzung des tiefen Untergrundes, stehen auf der einen Seite interessierte Investoren und Branchen, auf der anderen Seite regulatorische Unklarheiten, das öffentliche Interesse für den Schutz der Umweltgüter und deren optimale Nutzung sowie Risiken bei Exploration, Erschliessung und Nutzung. Einzelne Kantone haben in den letzten Jahren ihre Regalrechte und die damit verbundene Gesetzgebung aktualisiert oder sind im Ausarbeitungsprozess. Andere Kantone verzichten vorderhand auf gesetzgeberische Aktivitäten im Regal- und Untergrundbereich. Der Bund besitzt keine Regalrechte und hat seine Gesetzgebung bisher nicht auf eine spezifische Nutzung des tiefen Untergrunds und des Tiefengrundwassers ausgerichtet.
Wir haben somit eine Ausgangslage mit Nutzungspotenzialen für Tiefengrundwasser

und anderen Untergrundnutzungen, mit potenziell interessierten Investoren, mit dem Kanton als Grundwasser-Eigentümer, Regal-Inhaber, Planungs- und Bewilligungsbehörde und letztlich auch dem Bund, welcher für die übergeordnete Gesetzgebung zuständig ist (GSchG, USG, RPG). Um weiterzukommen, stellt sich die Frage, wer auf wen wartet: Der Bund auf neue Herausforderungen aus der sich entwickelnden Untergrundnutzung, die Kantone auf konkrete Projektgesuche und auf generelle Vorgaben des Bundes, die Investoren auf klare Bedingungen / Regelungen und damit auch auf eine bessere Investitionssicherheit?

Durch diese Ausgangslage ist das Investitionsklima für die Tiefengrundwasser-Nutzung derzeit nicht nur mit unternehmerischen Risiken (generelle Machbarkeit, ausreichende Wassermengen, Nachhaltigkeit, Rentabilität usw.) belastet, sondern auch mit unklaren Vorgaben. Die Voraussetzungen für eine Aktualisierung der Gesetzgebung und für die Erstellung von Vollzugshilfen für Nutzung und Schutz des Tiefengrundwassers sind gegeben. Die Behörden bewegen sich in der Schweiz jedoch seit Jahren in einem «antiregulatorischen» politischen Umfeld, in welchem die Wirtschaftsakteure oft auch die positiven Wirkungen einer gesetzlichen Regulierung nur schwer wahrnehmen können. In dieser Situation wird meist zugewartet, bis sich die Wirtschaftsakteure von den Vorteilen eines geregelten und sicheren Investitionsklimas überzeugt haben.

Die hydrogeologischen Kenntnisse sind bei den Tiefengrundwässern der Schweiz noch rudimentär und die Datenerhebung erfolgt unkoordiniert. Hier bedarf es mehr Forschungsaktivität und programmatischer Aufbauarbeit sowie neuer Minimalanforderungen an die Untersuchungen bei Tiefbohrungen und bei Bauvorhaben im tiefen Untergrund. Die Europäische Union ist diesbezüglich vorangeschritten mit dem neuen Projekt KINDRA (Knowledge Inventory for hydrogeology research), kurz vorgestellt in Petitta et al. 2015. In diesem Projekt wird die Forschungsebene mit den Nutzungs- und Schutzebenen (Wasserdirektiven, Wassermanagement, Modellierungen, Nutzungsstrategien, gesellschaftliche Ansprüche) verbunden. Erste Ergebnisse zur Terminologie und Methodologie liegen bereits vor.

Behörden, wissenschaftliche Institutionen, heutige Nutzer und potenzielle künftige Nutzer der Tiefengrundwässer sollten über fehlende Grundlagenkenntnisse, über Nutzungs-Priorisierungen und über Lücken in der Regulierung diskutieren. Dazu können bereits bestehende Arbeits- und Informations-Plattformen genutzt und allenfalls ergänzt werden. Angesichts der Verbundaufgabe Bund – Kantone für den Gewässerschutz ist es naheliegend, wenn die Initiative dafür von den Behörden ausgehen würde.

Literatur

Balderer, W. 1990: Hydrogeologische Charakterisierung der Grundwasservorkommen innerhalb der Molasse in der Nordschweiz aufgrund von hydrochemischen und Isotopen-Untersuchungen. Steirische Beitr. Hydrogeol., 41, 35–104.

Baujard, C., Signorelli, S. & Kohl, T. 2007: Atlas des ressources géothermiques de la Suisse: Domaine Sud-Ouest du Plateau Suisse. Beitr. Geol. Schweiz, Serie Geophysik, Nr. 40, 56 S.; Schw. Geophys. Komm., Zürich.

Bayerisches Landesamt für Umwelt, BLU [Ed.] 1995: Nutzung tiefer Grundwässer. BLU Augsburg, Merkblatt Nr. 1.4/6, 8 S.

Bertani, R. 2010: Geothermal Power Generation in the World 2005–2010; Update. Report World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.

Bianchetti, G. 1994: Hydrogéologie et géothermie de la région de Lavey-les-Bains (Vallée du Rhône, Suisse) [Hydrogeology and geothermal properties of the Lavey-les-Bains area (Rhone Valley, Switzerland)]. Bull. Centre d'Hydrogéol. Neuchâtel 13, 3–32.

Bianchetti, G., Roth, P., Vuataz, F.-D. & Vergain, J. 1992: Deep groundwater circulation in the Alps: Relations between water infiltration, inducted seismicity and thermal spring. The case of Val d'Illiez, Wallis. Eclogae Geol. Helv. 85/2, 291–305.

Bianchetti, G., Zuber, F., Vuataz, F.-D. & Rouiller J.-D. 1993: Hydrogeologische und geothermische Untersuchungen im Simplontunnel. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie 88.

Biehler, D., Schmassmann, H., Schneemann, K. & Sillanpää, J. 1993: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Dogger-, Lias-, Keuper- und Muschelkalk-Aquifere. Nagra, Wettingen, Techn. Bericht NTB 92-08.

Bissig, P., Goldscheider, N., Mayoraz, J., Surbeck, H. & Vuataz, F.-D. 2006: Carbogaseous spring waters, coldwater geysers and dry CO_2 exhalations in the tectonic window oft the Lower Engadine Valley, Switzerland. Eclogae Geol. Helv. 99/2, 143–155.

Björnsen Gurung, A. & Stähli, M. 2014: Wasserressourcen der Schweiz; Dargebot und Nutzung – heute und morgen. NFP 61: thematische Synthese 1 im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung», 72 S. NFP 61 & Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Bern.

Boem, J.-M., Flury, F. & Rieben, C. 2006: Recherche d'eau par forages profonds dans le Dogger (Grande Oolithe) du Jura tabulaire à Courtemaîche (Jura, Suisse). Swiss Bull. angew. Geol. 11/1, 19–34.

Bollinger, D. & Nyffenegger, K. 2012: Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Eine kurze Übersicht zu den Resultaten des Forschungsprogramms CCHydro. Swiss Bull. angew. Geol. 17/1, 85–88.

Bucher, K., Stober, I. & Seelig, U. 2012: Water deep inside the mountains: Unique water samples from the Gotthard rail base tunnel, Switzerland. Chem. Geol. 334, 240–253.

Bundesamt für Landwirtschaft BLW 2011: Klimastrategie Landwirtschaft. Klimaschutz und Anpassungen an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft. BLW, Bern.

Bundesamt für Umwelt BAFU, Bundesamt für Energie BFE, Bundesamt für Raumentwicklung ARE 2011: Bundesempfehlung zur Erarbeitung kantonaler Schutz- und Nutzungsstrategien. UVEK, Bern.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL 1998: Wegleitung zur Umsetzung des Grundwasserschutzes bei Untertagebauten. BUWAL, Bern (heute: Bundesamt für Umwelt BAFU).

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL 2004: Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, BUWAL, Bern (heute: Bundesamt für Umwelt BAFU).

Bundesamt für Umwelt BAFU 2009: Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung. Vollzug Umwelt Nr. 09/10, 51 S. BAFU, Bern.

Bundesamt für Umwelt BAFU 2012a: Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Umwelt-Wissen 1217, 76 S., BAFU, Bern.

Bundesamt für Umwelt BAFU 2012b: Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. Bericht des Bundesrates zum Postulat «Wasser und Landwirtschaft – Zukünftige Herausforderungen». (Postulat NR Hansjörg Walter vom 17.6.2010). BAFU, Bern.

Bundesamt für Umwelt BAFU 2013: Koordination wasserwirtschaftlicher Vorhaben – Die Abstimmung wasserwirtschaftlicher Vorhaben in und zwischen den Bereichen, den Staatsebenen und im Einzugsgebiet. Umwelt-Vollzug Nr. 1311, 58 S., BAFU, Bern.

Burger, H. 2011: Die Thermalwässer und Mineralwässer im Kanton Aargau und seiner näheren Umgebung. Aargauer Naturf. Ges., Mitt. Bd. 37, 91–111.

Burger, H. & Kozel, R. 2015: Thermal and mineral waters in Switzerland. In: The Geological Surveys of Europe [Ed.]: Wonder Water – The Value of Water, 120–124, EuroGeoSurveys, Brüssel.

Burri, P. & Meier, P. 2011: Tiefengeothermie ohne Nebenwirkungen? TEC21, Nov. 2011.

Bütler, M. 2013: Rechtliche Aspekte. In: 61 NELAK Schlussbericht, 53-116 im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung». NFP 61 & Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Bern.

Busslinger, A. 1998: Geothermische Prognosen für tiefliegende Tunnel. Diss. ETHZ Nr. 12'175, Zürich.

Butscher, C., Huggenberger, P., Auckenthaler, A. & Bänninger, D. 2011: Risikoorientierte Bewilligung von Erdwärmesonden. Grundwasser-Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 16, 13–24. Springer Verlag.

Carlé, W. 1975: Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa. Wiss. Verlagsgesellsch. MBH, Stuttgart.

Charminé, H. I., Carvalho, M. J., Alfonso, M. J., Teixeira, J. & Freitas, L. 2013: On a dialogue between hard-rock aquifer mapping and hydrogeological conceptual models: insights into groundwater exploration. European Geologist – Journal of the Europ. Fed. of Geologists 35, 26–31.

Chevalier, G., Diamond, L. W. & Leu, W. 2010: Potential for deep geological sequestration of CO_2 in Switzerland: a first appraisal. Swiss Journal of Geosciences 103/3, 427–455.

Demetriades, A., Cullen, K., Reimann, C., Birke, M. & the EGG Project team 2015: EGG: European Groundwater Geochemistry. European Geologist – Journal of the Europ. Fed. of Geologists 40, 20–28.

Dietrich, L. 2007: CO_2-Abscheidung und Ablagerung (CAA) im deutschen und europäischen Energieumweltrecht. Nomos, Baden-Baden.

Eidgenössische Geologische Fachkommission (EGK) 2013: Handlungsempfehlungen der EGK zur Regelung der Nutzung des tiefen Untergrundes (dat. 8. Dez. 2013). www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-51896.html

Eidgenössische Geologische Fachkommission (EGK) 2014: Handlungsempfehlungen der EGK zu Risiken, Potenzialen und Chancen von Hydraulic Fracturing (dat. 24. Nov. 2014). www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-55590.html

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich [ewz, Ed.] 2014: Erkundungsbohrung Sonnengarten (Zürich-Triemli) – Schlussbericht. www.ewz.ch, Broschüre, 44 S.

Europäische Kommission, Generaldirektion Umwelt 2014: Die Wasserrahmenrichtlinie der EU; Europäische Wasser-Rahmenrichtlinie [WRRL] – EG-Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000. Volltext publiziert im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 22.12.2000, Brüssel.

Fabbri, S., Madonna, C. & Zappone, A. 2014: Characterization of CO_2 reservoir rock in Switzerland. European Geoscience Union EGU, General Assembly 2014 Wien: 27. April – 2. Mai.

Ferguson, G. 2009: Unfinished business in geothermal energy. Ground Water 47(2), 167.

Freiburghaus, M. 2009: Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. Gas Wasser Abwasser, gwa 12/2009, 1001–1009.

Frick, S., Regenspurg, S., Kranz, S., Milsch, H., Saadat, A., Brandt, W., & Huenges, E. 2011: Geochemical and process engineering challenges for geothermal power generation. Chemie Ingenieur Technik 83/12, 2093–2104.

Frischknecht, R., Hofstetter, P., Knoepfel, I., Ménard, M., Dones, R. & Zollinger, E. 1996: Ökoinventare von Energiesystemen. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (3. Aufl.). Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern & Institut für Energietechnik der ETH, Zürich.

Fuhrer, J. 2010: Abschätzung des Bewässerungsbedarfs in der Landwirtschaft. Forschungsanst. Agroscope Reckenholz – Tänikon ART; Abschlussbericht, 26 S.

Fuhrer, J. & Calanca, P. 2014: Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: eine regionale Defizitanalyse. Agrarforschung Schweiz 5 (6), 256–263.

Fuhrer, J., Tendall, D., Klein, T., Lehmann, N., & Holzkaemper, A. 2013: Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. Forschungsanst. Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Schriftenreihe 19, 56 S.

Fuhrer, J.: Klimaänderung und die Schweiz 2050: Landwirtschaft. Forschungsanst. Agroscope Reckenholz – Tänikon ART; Folien. www.occc.ch/products/ch2050/Presentation/Fuhrer2.pdf

Gander, B., Venzin, K., Baumann, M., Biner, M., Jaccard, A., Marbach, R. & Meylan, B. 2009: Klimaänderung und Wasserversorgung – Informationen und Anpassungsstrategien. Gas Wasser Abwasser, gwa 4/2009, 241–249.

Giggenbach, W. F. 1991: Chemical techniques in geothermal exploration. In: D' Amore, F. [Ed.]: Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development. UNITAR/UNDP publication, Rome, 252–270.

Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendrijk, E. & Bayani Cardenas, M. 2016: The global volume and distribution of modern groundwater. Nature Geoscience 9/2016, 161–167.

Gorhan, H. L. & Griesser, J. C. 1988: Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad – Baden. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie 76.

Gränicher, H. [Hrsg.] 1997: Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, NEFF: Schlussbericht über die Tätigkeit des NEFF (Berichte in deutsch, englisch und französisch). NEFF, Basel.

Griebler, C. & Mösslacher, F. 2003: Grundwasser-Ökologie. Facultas UTB 2111, Wien.

Guglielmetti, L. & Schill, E. 2011: Project for a database of deep aquifers of Switzerland. Univ. Neuchâtel.

Guglielmetti, L. 2012: Multidisciplinary approch of geothermal prospection in the Argentera Massif (South-Western Alps). Diss. Univ. Neuchâtel, 193 S.

Guntli, P., Keller, F., Luccini, R. & Rust, S. 2016: Gotthard-Basistunnel: Geologie, Geotechnik, Hydrogeologie – zusammenfassender Schlussbericht. Ber. Landesgeol. 7, Wabern.

Hartmann, P. 1998: Mineralwasservorkommen im nördlichen Bündnerschiefergebiet mit Schwerpunkt Valsertal. Diss. ETH Zürich Nr. 12632.

Hartmann, D. & Meylan, B. 2013: Engpässen rechtzeitig vorbeugen – Wichtigste Ergebnisse der Studie «Wasserversorgung 2025». Aqua & Gas 09/13, 16–24.

Hessenauer, M. & Flury, F. 2010: Prospection d'eau souterraine par forage profond incliné à Miécourt (Canton du Jura, Suisse). Swiss Bull. angew. Geol. 15/1, 23–42.

Hirschberg, S., Wiemer, S. & Burgherr, P. [Eds.] 2015: Energy from the Earth. Deep Geothermal as a Ressource for the Future? TA-SWISS 62/2015, vdf-Hochschulverlag, Zürich.

Högl, O. 1980: Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Verlag P. Haupt Bern.

Imhasly, S., Signorelli, S. & Rybach, L. 2015: Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz – Ausgabe 2014. Geowatt AG, Zürich.

Ingebritsen, S., Sanford, W. E. & Neuzil, C. E. 2006: Groundwater in Geologic Processes. 2nd Ed. Cambridge University Press.

Jahnke, C., Endler, R. & Janetz, S. 2012: Projekt «brine»-Versalzungsprozesse von Süsswasser-

aquiferen – Analyse und Modellierung im Hinblick auf eine mögliche CO_2-Speicherung in salinen Grundwasserleitern. In: Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Modelle, Analysen und Anwendungen. Tagung Fachsektion Hydrogeologie der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (DGG) 2012; Kurzfassung der Vorträge und Poster. Schriftenreihe der DGG, Heft 78.

Kang, M. & Jackson, R. B. 2016: Salinity of deep groundwater in California: Water quantity, quality, and protection. Proceed. Nat. Acad. Sciences USA (PNAS), Vol. 113, Nr. 28, 7768–7773.

Keller, F., Wanner, H. & Schneider, T. R. 1987: Geologischer Schlussbericht Gotthard-Strassentunnel: Geologie. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie 70.

Kharka, Y. K., Cole, D. R., Hovorka, S. D., Gunter, W. D., Knauss, H. D. & Freifeld, B. M. 2006: Gas-water-rock interactions in Frio Formation following CO_2 injection: Implications for the storage of greenhouse gases in sedimentary basins. Geology 2006, 577 pp.

Kohl, T., Schill, E. & Baujard, C. 2010: Integrative geothermal resource assessment of the Swiss Molasse Basin. Proceed. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.

Lanz, K., Rahn, E., Siber, R. & Stamm, C. 2014: Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck. NFP 61: thematische Synthese 2 im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung», 84 S. NFP 61 & Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Bern.

Leitungsgruppe NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz» [Hrsg.] 2015: NFP 61 weist Wege in die Zukunft. Gesamtsynthese. vdf-Verlag, ETH Zürich.

Liedl, R., Burghardt, D., Simon, E., Reimann, Th., & Kaufmann-Knogge, R. [Herausg.] 2012: Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Modelle, Analysen und Anwendungen. Tagung Fachsektion Hydrogeologie der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (DGG) 2012; Kurzfassung der Vorträge und Poster. Schriftenreihe der DGG, Heft 78.

Liermann, S. 2014: Hydraulic Fracturing – Application of Best Practices in Germany. Swiss Bull. angew. Geol. 19/2, 53–64.

Loveless, S., Farr, G., Ward, R. & Smedley, P. [Ed.] 2015: Wonder Water. The Value of Water. EuroGeoSurveys (The Geological Surveys of Europe), Brüssel.

Lützenkirchen, V. 2002: Structural geology and hydrogeology of brittle fault zones in the central and eastern Gotthard massif, Switzerland. Diss. ETH Nr. 14749, Geol. Institut ETH, Zürich.

Margat, J. & van der Gun, J. 2013: Groundwater around the World: A Geographic Synopsis. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA; 376 pp.

Masset, O. & Löw, S. 2010: Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland. Hydrogeology Journal, 18/4, 863–891.

Matousek, F. & Graf, H. R. 1998: Trinkwasser und Wärme aus 300 Metern Tiefe. In: Gas, Wasser, Abwasser 1/98. Schweiz. Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW), Zürich.

Näf, H. 2015: Die Geothermie-Tiefbohrung St. Gallen GT-1. Swiss Bull. angew. Geol. 20/1, 3–31.

Nagra 2002: Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Nagra, Wettingen, Techn. Ber. NTB 02-03.

Nagra 2008: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Geologische Grundlagen (Text- und Beilagenband). Nagra, Wettingen, Techn. Ber. NTB 08-04.

NEFF, Nationaler Energieforschungs-Fonds 1980: Geothermische Prospektion im Raume Koblenz-Wildegg-Dielsdorf (Schlussbericht). Forschungsprojekt geothermische Energie und unterirdische Wärmespeicherung. NEFF, Basel.

Niederberger, B. 2012: Deep geothermal Use in Switzerland: Key factors for a collaborative data management. Univ. Neuchâtel, Technical Report.

Nussberger, G., Cadisch, J., Keller, A., Nussberger, A. & Werder, J. 1937: Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Zimmermann, Bern.

Österreichischer Arbeitskreis «Grundwasser» des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaften, Umwelt und Wasserwirtschaft [BMLFUW] 2002: Lage und Abgrenzung von Grundwasserkörpern. BMLFUW, Wien, 38 S. plus Tab. & Karte.

Pastorelli, S., Marini, L. & Hunziker, J. C. 2001: Chemistry, isotope values (dD, $d^{18}O$, $d34sSO_4$) and temperatures of the water inflows in two Gotthard tunnels, Swiss Alps. Applied Geochemistry 16, 633–649.

Pesendorfer, M. & Löw, S. 2010: Subsurface exploration and transient pressure testing from a deep tunnel in fractured and karstified limestones (Lötschberg Base Tunnel, Switzerland). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47/1, 121–137.

Petitta, M., Balazs, B., Caschetto, M., Colombani, M., Correia, V., Csekö, A., Di Cairano, M., Fernández, I., Garcia Alibrandi, C., Hartai, E., Hinsby, K., Madarász, T., Mikita, V., García Padilla, M., Szücs, P. & van der Keur, P. 2015: The KINDRA project: a tool for sharing Europe's groundwater research and knowledge. European Geologist – Journal of the Europ. Fed. of Geologists 40, 5–8.

Reimann, C. & Birke, M. [Ed.] 2010: Geochemistry of European Bottled Water. Borntraeger Science Publishers, Stuttgart; 268 pp., Zusatzdaten auf CD.

Rybach, L. 2015: Classification of geothermal resources by potential. Geoth. Energy Science 03/2015, 13–17.

Rybach, L. 2010: Tiefe Geothermie, Stand und Perspektiven. Mitt. Geotechnik Schweiz, Heft 161.

Schmassmann, H., Balderer, W., Kanz, W. & Pekdeger, A. 1984: Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. Nagra, Wettingen, Techn. Bericht NTB 84-21.

Schmassmann, H. 1990a: Hydrochemical and isotopic investigations on groundwater origin and flow paths in Switzerland. In: Parriaux, A. (Ed.): Water Resources in Mountain Regions. Mem. 22nd Congr. Int. Assoc. Hydrogeologists, Vol. XXII/1, 230–243.

Schmassmann, H. 1990b: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malm-Aquifere. Nagra, Wettingen, Techn. Ber. NTB 88-07.

Schmassmann, H., Kullin, M. & Schneemann, K. 1992: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Buntsandstein-, Perm- und Kristallin-Aquifere. Nagra, Wettingen, Techn. Ber. NTB 92-08.

Schmid, F., Walter, F., Schneider, F. & Rist, S. 2014: Nachhaltige Wassergouvernanz: Herausforderungen und Wege in die Zukunft. NFP 61: thematische Synthese 4 im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung», 62 S. NFP 61 & Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Bern.

Schweizerische Eidgenossenschaft 1991: Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG , SR 814.20), Stand am 8. September 2015. Bern, Bundeskanzlei.

Schweizerische Eidgenossenschaft 1983: Bundesgesetz über den Schutz der Umwelt (Umweltschutzgesetz, USG, SR 814.01), Stand am 1. April 2015. Bern, Bundeskanzlei.

Schweizerische Eidgenossenschaft 1979: Bundesgesetz über die Raumplanung (Raumplanungsgesetz, RPG, SR 700), Stand am 1. Mai 2014. Bern, Bundeskanzlei.

Schweizerische Eidgenossenschaft 1998: Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201), Stand am 1. Oktober 2015. Schweizerischer Bundesrat, Bern, Bundeskanzlei.

Schürch M. 2011: Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser. Gas Wasser Abwasser, gwa 3/2011, 177–182.

Schürch, M., Höhn, E., Hunkeler, D., Matousek F. & Pascal Turberg, P. 2012: Klimaänderung und deren Auswirkungen auf die Grundwasserressourcen – Resultate des gleichnamigen Workshops vom 11. Mai 2012. Swiss Bull. angew. Geol. 17/2, 85–92.

Siddiqi, G., & Minder, R. 2010: The Swiss federal office of energy's path on the road to utilizing Switzerland's geothermal resources – From research & development to pilot- and demonstration projects. Swiss Bull. angew. Geol. 15/1, 79–93.

Signorelli, S. & Kohl, T. 2006: Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz: Gebiet des nördlichen Schweizer Mittellandes. Beitr. Geol. Schweiz, Serie Geophysik, Nr. 39, 94 S.; Schw. Geophys. Komm., Zürich.

Sinreich, M., Kozel, R., Lützenkirchen, V., Matousek, F., Jeannin, P.-Y., Löw, S. & Stauffer, F. 2012: Grundwasserressourcen der Schweiz. Abschätzung von Kennwerten. Aqua & Gas 9/2012, 16–28.

Sonney, R., Vuataz F.-D. & Schill, E. 2012: Hydrothermal circulation systems of the Lavey-les-Bains, Saint Gervais-les Bains and Val d'Illiez areas associated with the Aiguilles Rouges Massif in Switzerland and France. Swiss Bull. angew. Geol. 17/1, 29–47.

Stober, I. & Bucher, K. 1999: Deep Groundwater in the crystalline basement of the Black Forest region. Appl. Geochem. 14, 237–254.

Strayle, G., Stober, I. & Scholz W. 1994: Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen. Inf. Geol. LA Baden-Württ. 6, 1–114.

Stoll, T. & Wyss, R. 2011: Die neue Valser-Mineralquelle: Die St. Paulsquelle. Swiss Bull. angew. Geologie, 16/1, 35–50.

Szocs, T., Tóth, G., Nádor, A., Rman, N., Prestor, J., Lapanje, A., Rotár-Szalkai, A., Cernák, R. & Schubert, G. 2015: Long-term impact of transboundary cooperation on groundwater management (Pannonian Basin). European Geologist – Journal of the Europ. Fed. of Geologists 40, 29–33.

Thury, M., Gautschi, A., Mazurek, M., Müller, W. H., Naef, H., Pearson, F. J., Vomvoris, S. & Wilson, W. 1994: Geology and hydrology of the Crystalline basement of Northern Switzerland. Synthesis of regional investigations 1981–1993 within the Nagra radioactive waste disposal programme. Nagra, Wettingen, Techn. Ber. NTB 93-01.

Tillner, E., Kempka, T., Jolie, E. & Kühn, M. 2012: Konkurrierende Nutzung oder Synergie? – Geothermische Energiegewinnung im Rahmen einer geologischen CO_2-Speicherung. In: Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Modelle, Analysen und Anwendungen. Tagung Fachsektion Hydrogeologie der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (DGG) 2012; Kurzfassung der Vorträge und Poster. Schriftenreihe der DGG, Heft 78.

Toth, J. 2009: Gravitional Systems of Groundwater Flow. Theory, Evaluation, Utilization. Cambridge University Press.

Vuataz, F. D. 1982: Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. Matér. Géol. Suisse, Sér. Hydrol. 29.

Waber, H. N., Heidinger, M., Lorenz, G. & Traber, D. 2014: Hydrochemie und Isotopenhydrogeologie von Tiefengrundwässern in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland. Nagra, Arbeitsbericht NAB 13-63, Wettingen.

Waber, H. N., Bissig, P., Huggenberger, P., Meylan, B., Milnes, E. & Walter, U. 2015: Tiefengrundwasser: Vorkommen, Nutzungspotenzial und Schutzwürdigkeit. Aqua & Gas 2015/4, 32–41.

Wasserwirtschaft Land Steiermark 2011: Die Nutzung von Tiefengrundwasser aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Planung. Strategiepapier «Tiefengrundwasser». Land Steiermark;

Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit, Fachabteilung 19A, Graz, 27 S.
Wegmüller, M. C. 2001: Einflüsse des Bergwassers auf Tiefbau / Tunnelbau. Stäubli AG, Zürich.
Ziegler C. 2013: Geothermie – Alternative zu konventionellem Heizen und Kühlen von Gebäuden; Interessenlage zwischen Energiegewinnung und Grundwasserschutz. Deutscher Industrieverlag DIV, München, 200 S.

Verdankungen

Meinen Kolleginnen und Kollegen in der Arbeitsgruppe «Tiefengrundwasser» der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie danke ich bestens für die Durchsicht des Artikels, deren Diskussion und ihre Anregungen und Ergänzungsvorschläge; besonders danken möchte ich dabei Pius Bissig, Peter Huggenberger, Volker Lützenkirchen, Benjamin Meylan, Daniel Traber, Niklaus Waber und Ulrike Walter.