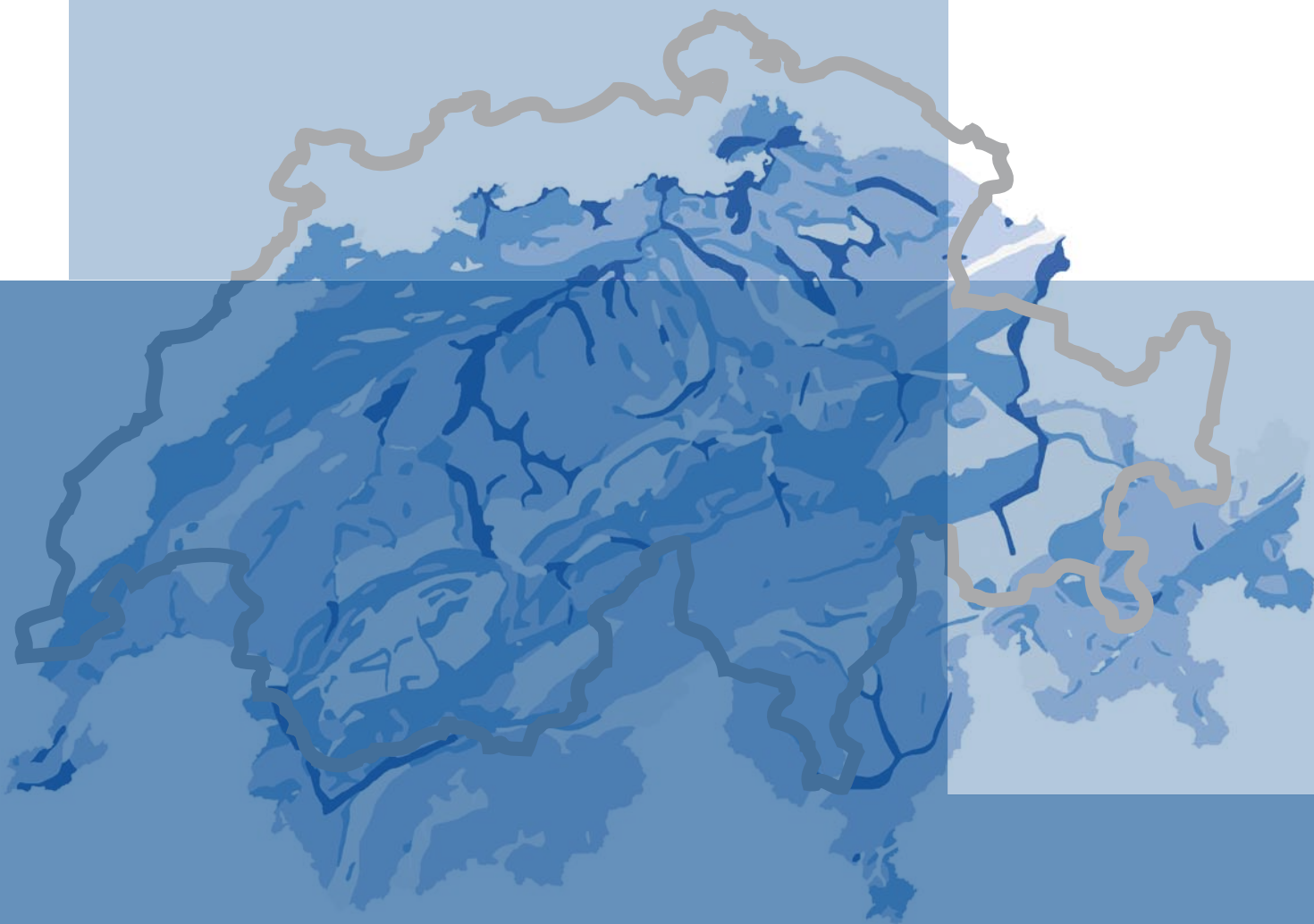


GRUNDWASSERRESSOURCEN DER SCHWEIZ

ABSCHÄTZUNG VON KENNWERTEN



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Michael Sinreich; Ronald Kozel, Bundesamt für Umwelt BAFU
Volker Lützenkirchen; Federico Matousek, Dr. von Moos AG
Pierre-Yves Jeannin, Schweiz. Institut für Speläologie und Karstforschung SSKA
Simon Löw; Fritz Stauffer, ETH Zürich

GRUNDWASSERRESSOURCEN DER SCHWEIZ

ABSCHÄTZUNG VON KENNWERTEN

Die Schweiz verfügt über reichhaltige Grundwasserressourcen, welche zu über 80% der öffentlichen Trinkwasserversorgung beitragen. Als Kennwerte dieser Ressource wurden zum einen das Grundwasservolumen und zum anderen das Grundwasserdargebot für die verschiedenen Grundwasserleitertypen bestimmt. Im Untergrund der Schweiz sind demnach insgesamt etwa 150 km³ Grundwasser vorhanden; davon sind gut 10% (ca. 18 km³) jährlich erneuerbar und können nachhaltig genutzt werden.

*Michael Sinreich; Ronald Kozel, Bundesamt für Umwelt BAFU
Volker Lützenkirchen; Federico Matousek, Dr. von Moos AG
Pierre-Yves Jeannin, Schweiz. Institut für Speläologie und Karstforschung SSKA
Simon Löw; Fritz Stauffer, ETH Zürich*

RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DE SUISSE

EVALUATION DE PARAMÈTRES CLÉS

Du fait de leur contribution à 80% de l'approvisionnement en eau potable, les eaux souterraines constituent en Suisse une ressource socio-économique d'importance nationale. Malgré une apparente richesse en eau et une recharge des nappes généralement élevée, la gestion durable de cette ressource nécessite une vision quantitative à l'échelle nationale. Pour ce faire, une évaluation du *volume utilisable* ainsi que du *rendement durablement utilisable* des eaux souterraines a été faite. Les résultats montrent qu'environ 150 km³ d'eaux souterraines sont stockés dans le sous-sol de la Suisse, dont plus de 10% (environ 18 km³) sont annuellement utilisables de façon durable en plus d'être renouvelables. Il en ressort que le volume des eaux souterraines correspond à peu près au volume d'eau total des lacs suisses. Alors que les aquifères poreux constituent une partie mineure de ce volume, la majorité est liée aux aquifères karstiques, bien que cela dépende de la limite en profondeur jusqu'à laquelle l'aquifère est considéré comme exploitable. Toutefois, les aquifères poreux contribuent à plus de la moitié du rendement durablement utilisable. Ceci est principalement lié à une infiltration des eaux de rivière potentiellement élevée dans les fonds de vallées. En-ce >

EINLEITUNG

Grundwasser ist Teil des Wasserkreislaufs und nimmt eine Schlüsselrolle bei der Wasserversorgung in der Schweiz ein. Da es grösstenteils im Untergrund verborgen ist, und auch aufgrund des hiesigen generellen Wasserreichtums, tritt dieser Umstand eher selten ins Bewusstsein der Öffentlichkeit. Grundwasser bildet jedoch eine der wichtigsten natürlichen Ressourcen des Landes, hinsichtlich derer Menge und Verfügbarkeit sich die Schweiz in einer komfortablen Lage befindet.

Die Bedeutung des Grundwassers erfordert detaillierte Kenntnis hinsichtlich Zustand und Entwicklung der Ressource. Dabei stehen der Schutz und die Nachhaltigkeit der Nutzung im Fokus. So werden etwa bei der Grundwasserentnahme umfangreiche Untersuchungen mit teilweise komplexen Modellen zum Einzugsgebiet einer Fassung durchgeführt [1]. Auch liegen mitunter im regionalen resp. kantonalen Massstab fundierte Abschätzungen der Grundwasserressourcen vor. So verfügt etwa der Kanton Bern schon seit Längerem über eine Karte seiner Lockergesteins-Grundwasserleiter inklusive Bilanzierung von Verfügbarkeit und Nutzung [2]. Ein weiteres Beispiel ist eine hydrogeologische Studie zum Solothurner Wasseramt mit Erhebungen zum regionalen Grundwasserhaushalt [3]. Und der

Kanton St.Gallen hat kürzlich im Rahmen seines Wasserbewirtschaftungsplans ein vollständiges Inventar seiner Grundwasservorkommen und -ressourcen herausgegeben [4].

Den Herausforderungen für eine nachhaltige Wassernutzung im Hinblick auf Bedarfsentwicklungen und die klimatischen Veränderungen wird derzeit im Rahmen von gesamtschweizerisch koordinierten Forschungsprojekten Rechnung getragen [5]. Eine umfassende Quantifizierung der Grundwasserressourcen im landesweiten Massstab fehlt aber bislang, bzw. gehen mitunter herangezogene Mengenangaben auf Grobschätzungen aus den 1970er-Jahren zurück. Die nun vorliegende Erhebung von Kennwerten zu den Grundwasserressourcen der Schweiz soll diese Lücke schliessen. Es werden Abschätzungen zum Grundwasservolumen und dem Grundwasserdargebot präsentiert, inklusive einer Skizzierung der Herleitung mithilfe verschiedener empirischer Ansätze, welche auf die spezifischen hydrogeologischen Verhältnisse angepasst sind. Damit stehen nun aktuelle Zahlen zur Einordnung und als Grundlagendaten für die Bewirtschaftung dieser Ressource zur Verfügung.

WASSERKREISLAUF

Als Komponente des Wasserkreislaufs unterliegt Grundwasser dem stetigen Prozess des Auffüllens und Auslaufens (Fig. 1). Niederschlag bildet die Eingangsgrösse für die quantitative Betrachtung des Grundwassers. Versickerndes Regenwasser (oder auch Schmelzwasser), das nicht direkt verdunstet bzw. durch die Vegetation aufgenommen wird (Evapotranspiration), führt zu oberirdischem und unterirdischem Abfluss [7]. Der unterirdische Abfluss ist gleichbedeutend mit der Neubildung von Grundwasser. Hohe Niederschlagsmengen und ein signifikanter Versickerungsanteil gehen folglich mit einer vergleichsweise hohen Grundwasserneubildungsrate einher. Lokal und regional hängen der Anteil der Versickerung und damit die Grundwasserneubildung von vielen Faktoren ab, wie etwa der Bodenbeschaffenheit und der Landnutzung, der Topographie, klimatischen Faktoren und nicht zuletzt der Art des Untergrunds. So erfolgt etwa in Karstgebieten fast der gesamte Abfluss unterirdisch als Grundwasser. Ein weiteres Element der Neubildung stellt

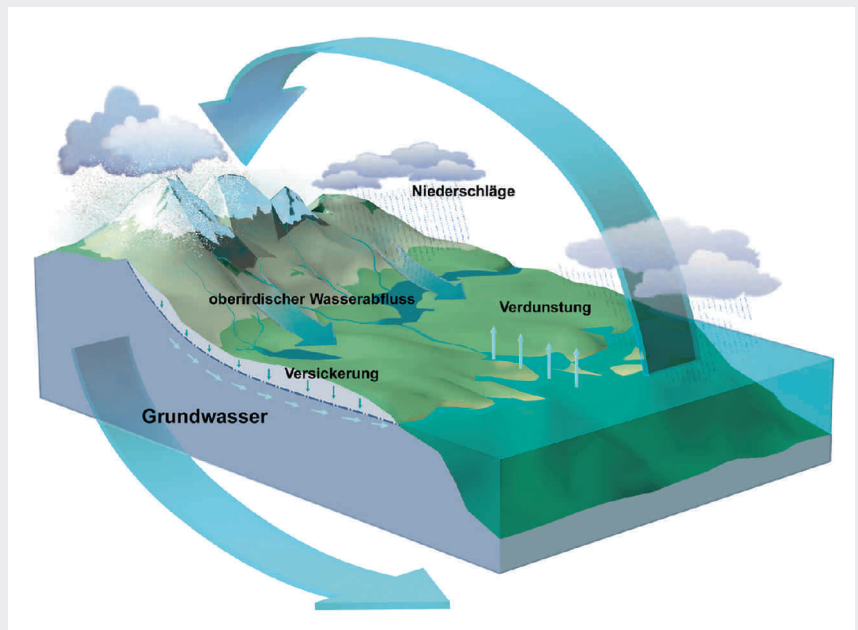


Fig. 1 Grundwasser als Komponente des Wasserkreislaufs [6]

Les eaux souterraines en tant que composante du cycle de l'eau [6]

die Infiltration von Flusswasser dar, bei der ein Teil des oberirdischen Abflusses über die Gerinnesohle in flussgebundene Grundwasserleiter übertritt. Dabei können z.B. Grundwasserleiter im Mittelland von den hohen Niederschlagsmengen im alpinen Einzugsgebiet der grossen Flüsse profitieren [8]. Letztlich können Grundwasservorkommen durch Hang- bzw. Randzuflüsse aus anderen Grundwasserleitern gespeist werden. Zu signifikanten unterirdischen Zuflüssen aus den Nachbarländern kommt es z.B. am Hochrhein im Gebiet Hegau-Schaffhausen [9] oder auch im Jura entlang der schweizerisch-französischen Grenze.

An Quellen und durch Exfiltration in Oberflächengewässer trägt das Grundwasser dann wiederum zum oberirdischen Abfluss bei. Für den Basisabfluss von Fliessgewässern spielt das Grundwasser eine bedeutende Rolle [10]. Der Anteil von Oberflächenwasser, das einmal Grundwasser war, ist zudem auch aufgrund der ständigen Infiltrations- und Exfiltrationsprozesse entlang der Flussläufe beträchtlich. Grundwasser stellt – ähnlich den Gletschern und Seen – einen Zwischenspeicher für den Abfluss dar. Es hat damit eine Dämpfungs- und Rückhaltefunktion für den Gesamtabfluss. Während im Sommer ein grosser Teil des Niederschlags- und Bodenwassers durch Verdunstung und infolge der Vegetationsaktivität aufgebraucht wird, erfolgt die Neubildung in vielen Grundwasservorkommen vorrangig im Winter-

halbjahr. Grundwasser trägt damit neben der Schnee- und Gletscherschmelze wesentlich zur ganzjährigen Verfügbarkeit der Wasserressourcen bei. Eine ausreichende Grundwassermenge bildet dabei die Grundlage nicht nur für die Trinkwasserversorgung in der Schweiz, sondern z.B. über Quellen, Exfiltrationszonen und oberflächennahe Grundwasserstände auch für den Erhalt grundwasserabhängiger Ökosysteme.

HYDROGEOLOGIE

Die hydrogeologischen Verhältnisse in der Schweiz lassen sich vereinfacht drei Grundwasserleitertypen zuordnen (Fig. 2), innerhalb derer wiederum unterschiedliche Einheiten charakteristisch sind. Sie zeichnen sich jeweils durch typische Eigenschaften etwa in Bezug auf das Fliessverhalten, die Speicherfähigkeit, oder auch die Reaktion auf Niederschlagsereignisse aus [11, 12]. Meist handelt es sich um oberflächennahe Grundwasservorkommen mit einer Mächtigkeit von einigen Metern bis Zehnermetern in Lockergesteinen sowie bis zu mehreren hundert Metern in Festgesteinen. Regional gibt es auch tiefes Grundwasser [13], welches dann aber nicht unbedingt aktiv am Wasserkreislauf teilnimmt. Bedeutende Lockergesteins-Grundwasserleiter sind in der Schweiz vor allem entlang der grossen Flüsse des Mittellandes sowie in den Alpentälern ausgebildet. Hier spielt neben der Versickerung

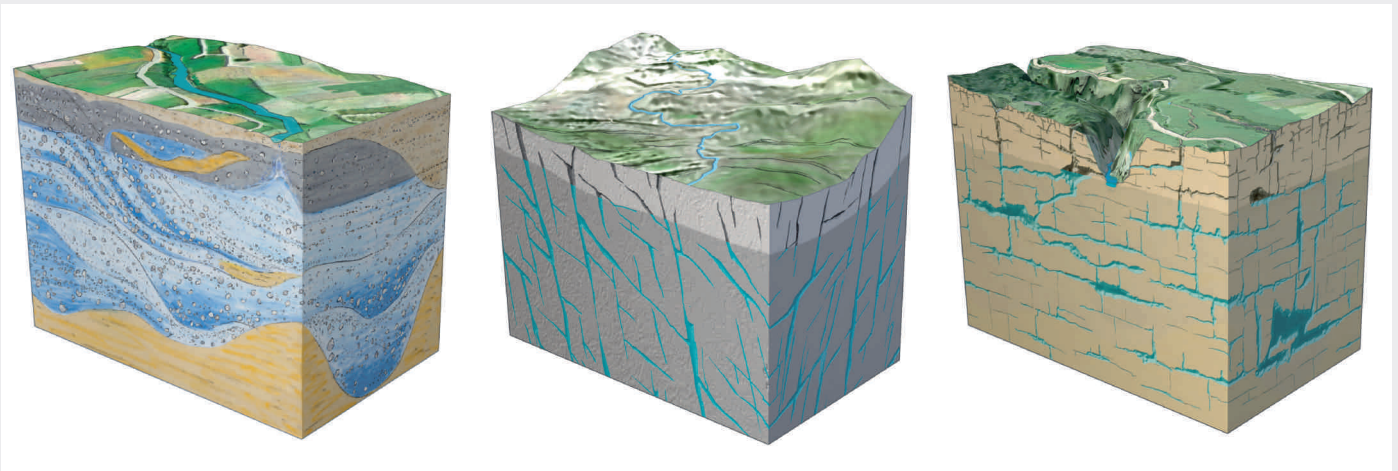


Fig. 2 Grundwasserleitertypen der Schweiz [6]: Lockergesteins-Grundwasserleiter, Kluft-Grundwasserleiter und Karst-Grundwasserleiter
Types d'aquifères en Suisse [6]: aquifères poreux, aquifères fissurés et aquifères karstiques

von Niederschlägen auch die Neubildung durch die Infiltration von Flusswasser eine signifikante Rolle. Ausserhalb der Talsohlen sind geringmächtige Moränen und lokal auch Hochterrassenschotter verbreitet. Lockergesteins-Grundwasserleiter weisen in der Regel eine relativ gute Speicherfähigkeit auf. Das Grundwasser fliesst hier eher langsam und gleichmässig durch die Poren von z.B. Sanden und Kiesen und erreicht selten Fließgeschwindigkeiten von mehr als einigen Metern pro Tag.

Der Untergrund des Mittellandes und der Alpen besteht in weiten Teilen aus Kluftgesteinen, zum Teil unter geringer Bedeckung. Dabei kommen die unterschiedlichsten Formen von Kluft-Grundwasserleitern vor [14]. Generell fliesst das Grundwasser in diesen Gesteinen entlang eines Netzes von Spalten und auch grösseren Störungen, z. B. in kristallinen Gesteinen wie Graniten und Gneisen, in klastischen Kluft-Grundwasserleitern teilweise aber auch in den Poren des Gesteins, wie z. B. in Konglomeraten und Sandsteinen der Molasse. Die Fließgeschwindigkeiten sind dementsprechend variabel und können mehrere 100 m pro Tag erreichen.

Karst-Grundwasserleiter sind in den Alpen und im Jura verbreitet. In durch Lösungsprozesse entstandenen Hohlräumen (Röhren, Höhlen) kann das Grundwasser bis zu mehrere 100 m pro Stunde fließen, weshalb Karstquellen meist unmittelbar auf Niederschlagsereignisse reagieren. Dieses Karstnetz entwässert auch die weniger durchlässigen Gesteinsbereiche, in denen Grundwasser über Wochen bis zu Jahren gespeichert werden kann. Die Grundwasserneubildung

erfolgt neben der flächenhaften Versickerung oft durch an Schlucklöchern versinkende Bäche. In Karstgebieten wird deshalb der Oberflächenabfluss oft nur durch Grundwasser an Quellaustritten gebildet.

NACHHALTIGE NUTZUNG

Grundwasser ist eine erneuerbare Ressource, deren Nutzung nach dem Prinzip der Nachhaltigkeit zu erfolgen hat. Dies bedeutet, dass die Wasserentnahme aus dem Untergrund die Grundwasserneubildung nicht überschreitet, also keine Aufzehrung der Ressource erfolgt. So darf gemäss Gewässerschutzgesetz einem Grundwasservorkommen langfristig nicht mehr Wasser entnommen werden, als ihm zufließt [15], also der Grundwasserspiegel nicht weiträumig und langfristig bzw. dauerhaft abgesenkt werden. Zur Verhinderung einer Übernutzung werden von den Vollzugsbehörden Konzessionsmengen zur Grundwasserentnahme ausgegeben. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Konzessionsmenge oft nicht auf eine Dauerentnahme, sondern eine kurzfristige Spitzenentnahme ausgelegt ist [16]. Eine Erhöhung der Verfügbarkeit kann durch künstliche Anreicherung von Grundwasser geschehen, z. B. im Zuge induzierter Infiltration durch das Pumpen an flussnahen Förderbrunnen (Erhöhung der Infiltrationsrate von Flusswasser) oder auch durch Versickerungsanlagen [1, 17]. Die nachhaltige Nutzung beinhaltet auch einen ökologischen Aspekt. So kann eine zeitweise oder gar dauerhafte Übernutzung mit Absenkung des Grundwasserspiegels zu einer bleibenden Beeinflussung grundwasserabhängiger Ökosysteme (Feuchtgebiete, Moore) res-

pektive unzureichender Restwassermenge z. B. an Quellen oder angebundenen Fließgewässern führen.

Mit einem Anteil von über 80% liefert das Grundwasser den mit Abstand wichtigsten Beitrag zur öffentlichen Trinkwasserversorgung des Landes. Laut Statistik des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches SVGW werden jährlich etwa 0,8 km³ Grundwasser für die öffentliche Wasserversorgung entnommen [18]. Hinzu kommen Entnahmen von etwa 0,5 km³ für Industrie sowie landwirtschaftliche Zwecke, bzw. für die private Trinkwasserversorgung [19]. Grundwasser bildet somit eine sozio-ökonomische Ressource nationaler Bedeutung. Über 35% des geförderten Trinkwassers stammen aus Lockergesteins-Grundwasserleitern [11]. Sie stehen häufig mit Fließgewässern in hydraulischer Verbindung, wodurch im Wesentlichen mehr oder weniger altes Uferfiltrat gefördert wird [20]. Die hohe Bedeutung der Flusswasserinfiltration und damit der flussgebundenen Grundwasserleiter zeigt sich an der Vielzahl von Förderbrunnen in Flussnähe innerhalb Grundwasservorkommen hoher Ergiebigkeit. Andererseits wird das Trinkwasser in der Schweiz auch zu mehr als der Hälfte aus Quellen gewonnen [18].

KENNWERTE

Zustand und Entwicklung hinsichtlich Grundwasserquantität werden in kantonalen Monitoringprogrammen sowie landesweit in typischen Grundwasservorkommen im Rahmen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA [21] erhoben. Jedoch liefert die Erfassung insbesondere von Grundwasserständen

keine Information zum Ausmass der Ressource, und dieses lässt sich auch nicht ohne Weiteres daraus ableiten. Der einzige hydrogeologische Datensatz mit Bezug zur Grundwassermenge, der landesweit einheitlich und flächendeckend vorliegt, stellt die Grundwasservorkommen der Schweiz kartografisch dar [22]. Er bildet im Folgenden die Basis für eine quantitative Bestimmung der nationalen Grundwasserressourcen. Deren Abschätzung erfolgt dann – unter Zuhilfenahme weiterer Daten und Informationen – über die Kennwerte Grundwasservolumen und Grundwasserdargebot.

ERGIEBIGKEIT

Die Tafel Grundwasservorkommen des Hydrologischen Atlas' der Schweiz HADES ([22], hier als Hydrogeologische Karte bezeichnet) gliedert die Vorkommen neben (hydro)geologischen und lithologischen Kriterien vorrangig nach deren Ergiebigkeit. Auch wenn der Begriff der Ergiebigkeit im Atlas nicht explizit definiert ist, wird doch eine erhöhte Wasserdurchlässigkeit des Untergrunds als Voraussetzung für die Bildung ergiebiger Grundwasservorkommen angesehen. Am ehesten kann sie dort als Kombination von Durchlässigkeit und vorhandener bzw. erzielter Wassermenge verstanden werden, also ähnlich dem hydrogeologischen Begriff der Transmissivität (Durchlässigkeit \times Mächtigkeit). *Figur 3* zeigt eine generalisierte Darstellung der

Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in der Schweiz, basierend auf der Klassifizierung der Hydrogeologischen Karte [22], und zusätzlich räumlich generalisiert entsprechend der Verteilung der Grundwasserleitertypen [23].

Die Ergiebigkeit – als qualitative Grösse und kartografisch dargestellt – liefert keine mengenmässige Angabe bezüglich der Grundwasserressourcen. Sie weist lediglich aus, wie Teileinheiten relativ zueinander in Beziehung stehen, d.h. welche Grundwasservorkommen eine höhere und welche eine geringere Ergiebigkeit aufweisen. Der Grad der Ergiebigkeit bezieht sich dabei nicht auf die Grösse des Grundwasservorkommens, sondern auf jeden einzelnen Punkt der Teilfläche. So kann man etwa einem sehr ergiebigen Vorkommen grosser Erstreckung mehr Wasser entnehmen als einem ebenfalls als sehr ergiebig deklarierten kleineren Vorkommen. Insofern stellt die Klassifizierung nach der Ergiebigkeit eine gute Ausgangslage für die Berechnung quantitativer Kennwerte dar.

GRUNDWASSERVOLUMEN

Das Grundwasservolumen ist diejenige Menge an Wasser, die bei mittleren hydrologischen Verhältnissen im gesättigten Untergrund vorhanden ist. Es stellt einen Zwischenspeicher in der Wasserbilanz dar, ist a priori jedoch unabhängig von der Durchflussrate (*Fig. 4*). Die Bestimmung erfolgt also ohne Berücksichtigung

der Höhe von Grundwasserneubildung oder Grundwasseraustritt bzw. -entnahme. Unter natürlichen Bedingungen wird im langjährigen Verlauf genauso viel Wasser an Quellen und Flüsse abgegeben, wie durch Niederschlag und Flusswasserinfiltration neu gebildet wird, wodurch sich bezüglich des Volumens in den jeweiligen Grundwasservorkommen ein Gleichgewicht einstellt.

Hier wird der Kennwert als *nutzbares* Grundwasservolumen verstanden. Es umfasst Grundwasser, das technisch, (in absehbarer Zukunft) wirtschaftlich, und hinsichtlich der natürlichen Wasserqualität (Mineralisierung, Temperatur) theoretisch erschlossen werden kann. Die Grundwasserqualität hinsichtlich Belastungen mit Schadstoffen wird in dieser Erhebung nicht berücksichtigt. Hydrogeologisch handelt es sich – unabhängig von der Art des Grundwasserleiters – um das Wasser, das im Porenraum des Gesteins gespeichert ist, also das Volumen der wassergefüllten Hohlräume. Nutzbar heisst dabei auch, dass das Wasser frei ausfliessen kann bzw. mobilisierbar ist (effektive Porosität).

Auch wenn das Grundwasservolumen als nutzbar bezeichnet wird, wäre der vollständige Rückgriff darauf im Sinne einer nachhaltigen Nutzung natürlich unzulässig. Das Grundwasservolumen stellt lediglich den Durchflussspeicher für diejenige Wassermenge dar, die daraus nachhaltig entnommen werden kann. Dennoch handelt es sich beim Grundwasservolumen nicht nur um eine akademische Grösse. Es ist zunächst als ein Vorrat oder eine Grundwasserreserve zu verstehen. Daneben hat das Volumen direkte Auswirkungen auf die generelle Lage von Grundwasserständen, die Position von Quellen und auch auf die Fließsysteme (z.B. Infiltration und Exfiltration). Letztlich bestimmt es die Grösse des Zwischenspeichers und damit auch die Pufferfunktion des Systems. Je grösser das Grundwasservolumen, desto weniger drastisch sind die Auswirkungen bei zeitweiser Übernutzung oder reduzierter Neubildung eines Vorkommens. So können Quellen mit kleinem Einzugsgebiet und entsprechend geringem Grundwasservolumen während Trockenperioden auch schnell versiegen [24].

GRUNDWASSERDARLEBEN

Beim Grundwasserdargebot handelt es sich um diejenige Wassermenge, welche

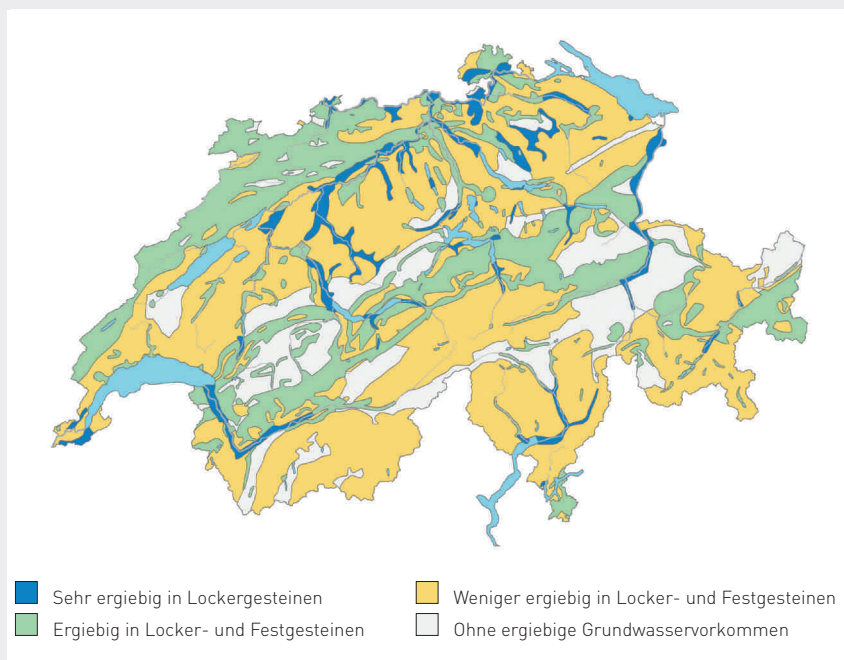


Fig. 3 Übersichtskarte der Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen
Esquisse de la productivité des réservoirs aquifères

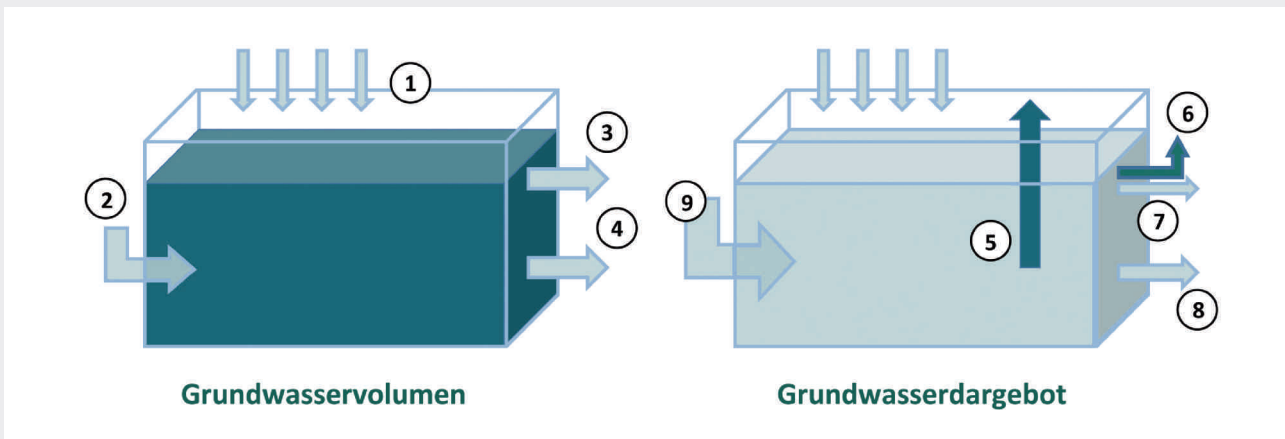


Fig. 4 Schematische Darstellung von Grundwasservolumen und Grundwasserdargebot eines Grundwasservorkommens. Das nutzbare Grundwasservolumen, aus dem bis zur Menge des nachhaltig nutzbaren Dargebots Grundwasser entnommen werden kann, ist zunächst unabhängig von der Durchflussrate. Die natürliche Grundwasserneubildung erfolgt über Niederschläge ① sowie Flusswasserinfiltration und unterirdische Hang-/Randzuflüsse ②, die Entwässerung an Quellen ③ und über Exfiltration in Oberflächengewässer oder Übertritt in andere Grundwasserleiter ④. Das nachhaltig nutzbare Grundwasserdargebot für die Entnahme an Förderbrunnen ⑤ und Quellen ⑥ hängt von der Grundwasserneubildung ab, reduziert um die Wassermenge, die nötig ist, um ökologischen ⑦ und wasserhaushaltlichen ⑧ Anforderungen zu genügen; durch induzierte Infiltration von Flusswasser ⑨ kann es künstlich erhöht werden

Représentation schématique du volume et du rendement des eaux souterraines d'un réservoir aquifère. Le volume utilisable, duquel seule une partie peut être exploitée durablement, est a priori indépendant du flux d'écoulement. La recharge naturelle de la nappe se fait d'une part par des précipitations ①, et d'autre part, par l'infiltration de l'eau des rivières et/ou des apports latéraux souterrains ②. La décharge se fait soit aux sources ③, soit par exfiltration dans les eaux de surface ou dans les aquifères adjacents ④. Le rendement durablement utilisable est réalisé aux puits ⑤ et aux sources ⑥. Il correspond à la recharge, réduite de la quantité d'eau nécessaire aux exigences concernant l'écologie ⑦ et le maintien d'un régime acceptable ⑧; il peut être augmenté artificiellement par une infiltration renforcée d'eau de rivière ⑨

dem Untergrund über einen längeren Zeitraum jährlich im Mittel entnommen werden kann. Relevant ist dabei das *nachhaltig nutzbare* Grundwasserdargebot, welches so definiert ist, dass es auch bei langfristiger Nutzung zu keiner nennenswerten Abnahme des Grundwasservolumens sowie keinen negativen ökologischen Auswirkungen kommt. Das Grundwasserdargebot resultiert aus der Grundwasserneubildung infolge Versickerung von Niederschlag und Infiltration von Flusswasser, also der Durchflussrate durch das gegebene Grundwasservolumen (Fig. 4). Es entspricht maximal der Neubildungsrate, jedoch reduziert um deren Anteil, der ökologisch und wasserhaushaltlich unentbehrlich ist. Induzierte Infiltration kann das Grundwasserdargebot an Förderbrunnen in bedeutendem Masse erhöhen, weshalb sie in flussgebundenen Grundwasserleitern einen wichtigen Beitrag zusätzlich zur natürlichen Neubildung darstellt. Das nachhaltig nutzbare Grundwasserdargebot hängt von diversen natürlichen Faktoren (Grundwasserneubildung durch Niederschläge, Interaktion Grundwasser-Oberflächenwasser, hydraulische Eigenschaften des Grundwasserleiters) ab. Zudem ist das als akzeptabel festgelegte Mass an aus der Nutzung resultierenden

Auswirkungen auf die Umwelt entscheidend. In der hydrogeologischen Praxis ist die grobe Abschätzung gebräuchlich, dass in über Förderbrunnen erschlossenen Grundwasservorkommen etwa 20% der natürlichen Neubildung nachhaltig nutzbar ist, d.h. ohne signifikante Veränderungen des Grundwasservorrats bzw. ohne ökologische Beeinträchtigungen entnommen werden kann [3, 16]. Insgesamt wird dem Wasserkreislauf nur wenig Wasser endgültig entzogen. Als Trink- oder Brauchwasser genutztes Grundwasser wird z.B. in Talsohlen meist noch im Bereich des Grundwasserleiters oder in geringer Entfernung durch Ab-

wasserreinigungsanlagen an das Oberflächenwasser abgegeben und steht damit unterstromig wieder für natürliche bzw. induzierte Infiltration zur Verfügung. Somit könnte das dort nutzbare Dargebot letztlich auch ein Vielfaches der natürlichen Neubildungsrate betragen.

ERHEBUNGSMETHODEN

Es liegt nahe, dass die unterschiedliche Ausbildung der Grundwasserleitertypen und das charakteristische Fliessverhalten spezifische und differenzierte Ansätze zur Bestimmung der Kennwerte erfordern. Diese Ansätze müssen dem gene-

	Grundwasservolumen	Grundwasserdargebot
Lockergesteins-Grundwasserleiter ausserhalb Talsohlen	Porosität *	Quell- und Fassungskataster
	Mächtigkeit *	Modellierung
Kluft-Grundwasserleiter	Porosität (Tunneldrainage) Mächtigkeit *	Quellkataster
Karst-Grundwasserleiter	Porosität * Mächtigkeit (Strukturanalyse)	Quellkataster

Tab. 1 Ansätze zur Erhebung der Kennwerte. Die entsprechenden Einheitswerte werden dann mit dem jeweiligen Flächenanteil auf der Hydrogeologischen Karte [22] in Beziehung gesetzt

* Literatur- und Erfahrungswerte

Approches appliquées pour l'évaluation des paramètres clés. Les valeurs normalisées de chaque type d'aquifère sont pondérées par la surface respective de la carte hydrogéologique [22].

* Littérature et valeurs empiriques

rellen hydrogeologischen Kontext der jeweiligen Grundwasserleitertypen sowie derer Teileinheiten gerecht werden. In *Tabelle 1* sind die Erhebungsmethoden für Grundwasservolumen und Grundwasserangebot aufgeführt. Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Umsetzung inklusive der wichtigsten Grundannahmen beschrieben.

KARTENGRUNDLAGE

Zur Hydrogeologie der Schweiz liegen zahlreiche Daten vor, welche u.a. in Form von Karten unterschiedlichen Massstabs zusammengefasst sind (z.B. Grundwasserkarten, hydrogeologische Karten 1:100 000 [25]), aus denen wiederum Detailinformationen entnommen werden können. Auf nationalem Massstab bildet die Hydrogeologische Karte der Schweiz [22] eine wertvolle Grundlage. Neben dem Inventar der Grundwasservorkommen sind geologische (v.a. Lithologie) und hydrogeologische Kriterien (v.a. Ergiebigkeit) für 10 hydrogeologische Einheiten im Aufnahmemassstab 1:200 000 dargestellt.

Der Datensatz liegt auch im digitalen Format vor [26] und liefert damit eine 2-dimensionale, schweizweit flächendeckende Darstellung der Art, Verbreitung und Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen für die Bearbeitung in geografischen Informationssystemen (GIS). Die Hydrogeologische Karte wird somit als wesentlich und massstabgerecht für die Erhebung der Kennwerte Grundwasservolumen und Grundwasserangebot erachtet und verwendet. Sie dient zunächst der Abgrenzung der Grundwasserleitertypen und derer Teileinheiten zueinander. Des Weiteren werden die mit den unterschiedlichen Erhebungsmethoden bestimmten Einheitswerte für die Grundwasserleitertypen hochgerechnet, d.h. GIS-basiert über den entsprechenden landesweiten Flächenanteil integriert. Die Hydrogeologische Karte bildet somit die gemeinsame Basis für alle Ansätze und gewährleistet damit die Vergleichbarkeit der Erhebung.

Lockergesteine werden im Datensatz in 6 Einheiten unterteilt (ID 1–6 von sehr ergiebig bis nicht ergiebig). Festgesteine werden weniger bis nicht ergiebigen Kluft-Grundwasserleitern (ID 9–11) oder den ergiebigen Karst-Grundwasserleitern (ID 8) zugeordnet. Für die Darstellung der Ergebnisse werden diese Einheiten hier entsprechend *Figur 3* teilweise wieder zu-

sammengefasst (*Tab. 2*). Bei den Festgesteinen wurde von der Flächenverteilung auf der Hydrogeologischen Karte insofern abgewichen, dass auch Kluft- und Karst-Grundwasserleiter unterhalb geringer Lockergesteinsbedeckung erfasst wurden. Für manche Ansätze war zudem eine Unterteilung in Regionen (Jura, Mittelland, Alpen-Helvetikum, Alpen-Kristallin) zur Berücksichtigung der grossräumigen Unterschiede bezüglich Klima, Morphologie und Geologie zielführend.

BESTIMMUNG VOLUMEN

Als statische Grösse kann das Grundwasservolumen nicht aus der Wasserbilanz abgeleitet werden. Es lässt sich aber im Falle bekannter Erstreckung eines Grundwasservorkommens aus dessen Mächtigkeit und Porosität berechnen. Hinsichtlich Annahmen und Angaben zu diesen beiden Parametern mussten neben Literatur- und Erfahrungswerten für die einzelnen hydrogeologischen Einheiten auch spezifische Herangehensweisen gewählt werden. Dabei ist das Vorgehen für die Festgesteine deutlich komplexer als für die Lockergesteine. Als anspruchsvoll erwiesen sich vor allem die Abschätzung der Mächtigkeit des wassergesättigten Untergrunds in Karstgebieten sowie Differenzierungen zwischen verschiedenen Arten von Kluftgesteinen. Zudem stellt sich bei Festgesteinen – anders als bei den nach unten generell gut abgrenzbaren Lockergesteinsablagerungen – die Frage der Tiefenbegrenzung des nutzbaren Grundwasservorkommens.

LOCKERGESTEINS-GRUNDWASSERLEITER

Auf der Hydrogeologischen Karte sind für sehr ergiebige und ergiebige Lockergesteins-Grundwasserleiter (*Fig. 5*) bereits Mächtigkeitsbereiche angegeben (> 20 m, 10–20 m, 2–10 m). Unter der Annahme, dass innerhalb dieser Klassen Flächen mit kleinen Mächtigkeiten jeweils häufiger vorkommen als solche mit grossen, wurden daraus wahrscheinliche Verteilungen und letztlich Mittelwerte abgeleitet. Diese betragen dann 35 m (nur Vorkommen bis 50 m betrachtet), 15 m und 6 m. Für die anderen Lockergesteine wurde eine einheitliche mittlere Mächtigkeit von 5 m angesetzt.

Die Porosität ist abhängig von der Art des Lockergesteins. Unter Auswertung der Standardliteratur und spezifischer Studien für die Verhältnisse in der Schweiz (z.B. [27, 28]) wurden Mittelwerte von 3% für Feinsande bis zu 20% für sehr ergiebige Schotter zugeschrieben. Die Lockergesteins-Grundwasserleiter wurden dann in Klassen vergleichbarer Porosität unterteilt und mit der entsprechenden Sedimentmächtigkeit kombiniert. Tiefe Grundwasserstockwerke in Lockergesteinen, wie sie in der Schweiz vereinzelt vorkommen [13, 28], wurden für die vorliegende Abschätzung nicht explizit berücksichtigt.

KLUFT-GRUNDWASSERLEITER

Für Kluft-Grundwasserleiter (nicht-verkarstungsfähige Festgesteine, *Fig. 6*) sind weitaus weniger verlässliche Daten hinsichtlich der Mächtigkeit als auch der



Fig. 5 Lockergesteinsablagerungen im Mittelland
Dépôts de roches meubles sur le Plateau



Fig. 6 Alpiner Kluft-Grundwasserleiter
Aquifère fissuré alpin

Porosität verfügbar. Zudem sind diese Gesteine in ihrer Ausbildung sehr variabel, was die Abschätzung einer wassergesättigten Mächtigkeit erschwert. Im alpinen Raum ist diese von der Tiefe der Verwitterungs- und Entlastungszone bestimmt [29] und bei normaler oberflächlicher Auflockerung nur bis in etwa 50 m relevant. Dieser Wert wurde jedoch nur für die Hälfte der Fläche mit Kluftgesteinen umgesetzt, da in grossen Teilen des Kristallins der Grundwasserflurabstand tiefer liegt. Dort ist im unverwitterten Gesteinsbereich die zur Wasserspeicherung nutzbare Kluftporosität jedoch vernachlässigbar gering. Dies steht im Einklang mit der Darstellung auf der Hydrogeologischen Karte, wo etwa die Hälfte der kristallinen Gebiete als nicht ergiebig («ohne ergiebige Grundwasservorkommen») ausgewiesen ist. Nur im Falle starker Auflockerung durch Hakenwurf oder Massenbewegungen wird eine Auflockerungszone bis in eine Tiefe von etwa 400 m angenommen. Dies ist für etwa 10% der Fläche der alpinen Kluft-Grundwasserleiter der Fall [30]. Zwar wurden bei Tiefbohrungen oder in Untertagebauten lokal durchaus wasserführende Klüfte in weitaus grösserer Tiefe angetroffen [31, 32], und diese sind auch für tiefe Fliesswege und die Speisung von (Thermal-)Quellen von Bedeutung, fallen aber hinsichtlich ihres Hohlraumvolumens nicht ins Gewicht. Für

die klastischen Kluft-Grundwasserleiter v.a. im Mittelland (Molasse-Sandsteine) wurde flächendeckend eine Mächtigkeit des gesättigten Untergrunds von 100 m angesetzt.

Für die drainierbare Porosität liegen typische Werte in kristallinen Kluftgesteinen bei 0,5–1%. Diese Werte nehmen mit der Tiefe ab und liegen unterhalb 400 m bereits um einen Faktor 10 darunter [33].

Für die vorliegende Abschätzung wurden anhand von Beispielen aus dem Gotthard-Massiv die Zuflussdaten in portalnahen Tunnelstrecken mit dem drainierten Wasservolumen des betroffenen Gebirgsvolumens in Beziehung gesetzt. Als mittlerer Wert wurde daraus eine nutzbare Porosität von 0,75% abgeleitet. Dieser Wert wurde dann für die Erhebung einheitlich verwendet und auch auf die ausseralpinen Kluft-Grundwasserleiter übertragen.

KARST-GRUNDWASSERLEITER

Für Karst-Grundwasserleiter (Fig. 7) wird die Mächtigkeit des gesättigten Untergrunds von den strukturellen und geomorphologischen Verhältnissen (Geometrie der Karbonat-Serien) bestimmt. Daher wurde sie mittels Strukturanalyse abgeschätzt, bei der Profile durch tektonische Einheiten des Jura und der Alpen ausgewertet wurden (Jura, Préalpes, Helvetikum, Penninikum, Ostalpin, Südalpin). Für jede dieser Einheiten wurden aus lokalen Profilen und unter Berücksichtigung der Höhenlage der wichtigsten Karstquellen, bzw. der Vorfluter, effektive Mächtigkeiten ermittelt. Die Annahme dabei ist, dass der Bereich zwischen Liegendstauer und dem Vorflutniveau resp. der Quellen dem gemittelten gesättigten Untergrund entspricht.

Der Hohlraumanteil in Karst-Grundwasserleitern ist äusserst heterogen über das Gestein verteilt mit Bereichen quasi ohne nutzbare Porosität bis hin zu Karströhren



Fig. 7 Grundwasservorkommen im Jura-Karst
Ecoulement karstique du Jura

und Höhlen. Diese Heterogenität ist sowohl hinsichtlich der Datenlage als auch in Bezug auf den Aufwand nicht einzeln erfassbar. Im Gesamtmasstab wurde eine Porosität von einheitlich 2% als realistisch für Schweizer Karst-Grundwasserleiter angesehen [9, 34].

Zwar ist im Karst bei Kenntnis der strukturellen Gegebenheiten der Liegendstauer oft gut definiert. Jedoch kann bei tiefen Vorkommen die natürliche Begrenzung unterhalb dessen liegen, was als nutzbar angesehen wird. Dies bezieht sich insbesondere auf eine Nutzung, welche neben technischen und wirtschaftlichen Limiten auch Probleme mit Temperatur und Mineralisierung in der Tiefe umfasst. Dieser Aspekt ist insbesondere im Bereich des Jura-Südfusses relevant, wo die verkarsteten jurassischen und triassischen Einheiten unter die Tertiärbedeckung des Mittellandes (Molasse) abtauchen. Dieser Teil der Karst-Grundwasserleiter wurde ebenfalls in die Abschätzung des Grundwasservolumens miteinbezogen. Entscheidendes Kriterium für das resultierende Volumen ist dann die Tiefenbegrenzung, für die 1000 m bei derzeitigem Kenntnisstand als angemessen erachtet wurden. Hintergrund sind bereits durchgeführte Bohrungen und Förderung von Grundwasser bzw. zukünftig denkbare Erschliessungen, welche momentan womöglich noch nicht unbedingt wirtschaftlich durchgeführt werden könnten. In der Tat wurden aber in der Schweiz bereits erfolgreiche Bohrungen zwischen 600 und 700 m zur Gewinnung von Trinkwasser abgeteuft [35, 36]. Auch in Tiefen grösser 1000 m sind beträchtliche Reserven anzunehmen. Dort stünde die tatsächlich zu erzielende Entnahmerate aber in einem derart schlechten Verhältnis zum Aufwand, dass von einer Nutzbarkeit nicht mehr ausgegangen werden kann.

BESTIMMUNG DARGEBOT

Das Grundwasserdargebot als die nachhaltig nutzbare Entnahmemenge pro Jahr ergibt sich zunächst maximal aus der natürlichen Grundwasserneubildung (verringert um den ökologischen Bedarf). Für flussgebundene Grundwasservorkommen innerhalb der Talsohlen kommt mit der induzierten Infiltration von Oberflächenwasser ein weiterer Aspekt hinzu. Für die Erhebung ist daher konzeptionell eine grundsätzliche Unterscheidung zweckmässig, nämlich ob die Grundwasserneubildung hauptsächlich durch Nie-

derschlag erfolgt, oder ob sie durch die Interaktion mit Fließgewässern geprägt ist. Während Flusswasserinfiltration nur für die Lockergesteins-Grundwasserleiter relevant ist, stellt die flächige Neubildung durch Niederschläge für alle Grundwasserleitertypen den gleichen Mechanismus dar, sodass das Grundwasserdargebot dann mit einem vergleichbaren Ansatz erhoben werden kann. Eine Zuordnung der Lockergesteine in Gebiete ausserhalb und innerhalb Talsohlen lässt sich anhand der geologischen Attribute der Hydrogeologischen Karte vornehmen (Alluvionen, Deckenschotter).

AUSSERHALB TALSOHLEN

Für die Abschätzung des Grundwasserdargebots ausserhalb der Talsohlen wurden Daten aus Quell- und Fassungskatastern herangezogen. Diese Grundwasservorkommen werden fast ausschliesslich durch die örtlichen Niederschläge gespeist und sind über Quelfassungen bzw. die Entnahme an Förderbrunnen erschlossen. Die in den Katastern verzeichneten Werte für die mittleren Quellschüttungen im jeweiligen Grundwasserleitertyp (sowie Förder- resp. Konzessionsmengen in hauptsächlich Lockergesteins-Grundwasserleitern) wurden dann dem dortigen Grundwasserdargebot grössenmässig gleichgesetzt. Dahinter steckt die Annahme, dass Quellen, welche im Kataster erscheinen, auch gefasst sind bzw. gefasst werden könnten, sowie dass die derzeitige Nutzung dieser Vorkommen auf nachhaltige Weise hinsichtlich des heutigen ökologischen Zustands mit entsprechender Restwassermenge erfolgt.

Die Vorgehensweise ist für alle Grundwasserleitertypen identisch. Auf Basis von regionalen Datensätzen zu Quellschüttungen und Grundwasserentnahmeraten einiger zur Berechnung benutzter Gebiete (meist Kantone) konnten mittlere Einheitswerte für einzelne Regionen und Grundwasserleitertypen (bzw. deren hydrogeologische Teileinheiten) getrennt bestimmt werden. Die Quelledichte und mittlere Schüttung ausgewählter und möglichst vollständiger Kataster wurden dann als typisch für diesen Grundwasserleitertyp und eine Region (z.B. Mittelland) angenommen und über die entsprechende Fläche extrapoliert. Eine Plausibilisierung dieser Werte kann dann wiederum über die Neubildungsrate aus Niederschlagsdaten erfolgen.

Einerseits wurde davon ausgegangen, dass regionale Kataster von Quellen und Grundwasserfassungen den massgeblichen Teil des nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebots erfassen. Das heisst, dass die bedeutenden schüttungsstarken Quellen in der Regel gefasst und deshalb in den Katastern verzeichnet sind. Andererseits wird dem Konzept der Nachhaltigkeit insofern Rechnung getragen, dass zahlreiche kleinere Quellen und diffuse Grundwasseraustritte nicht in den Katastern erscheinen und somit gemittelt über die Gesamtfläche ausreichend Restwasser zur Verfügung steht.

INNERHALB TALSOHLEN

Für Lockergesteine innerhalb Talsohlen wurde ein anderes Vorgehen gewählt. Hier spielt die Interaktion von Oberflächenwasser und Grundwasser (Infiltration und Exfiltration) eine entscheidende Rolle. Mithilfe eines numerischen Grundwassermodells wurden die Entnahmeraten für typische hydrogeologische Situationen in flussgebundenen Grundwasserleitern der Schweiz unter Ansetzung definierter Absenkungsbeträge berechnet. Dieses Vorgehen subsummiert alle Arten der Neubildung, also auch die Niederschläge und Hangzuflüsse, da die Entnahmemenge über die Absenkung definiert ist und die Flusswasserinfiltration als limitierender Faktor angenommen wird.

Die hydraulischen Verhältnisse in einem Modellaquifer mit einer Fläche von 2,5 km² (Erstreckung entlang 5 km eines Flusses bei einer Breite von 0,5 km) wurden für die Grundwasserentnahme an einer Serie von Förderbrunnen simuliert. Eine Sensitivitätsanalyse des Grundwassermodells zeigte grösste Abhängigkeiten für die Distanz zwischen Fluss und Förderbrunnen, die Durchlässigkeit der Flusssohle sowie die Transmissivität des Grundwasserleiters. Letztlich wurden hier Erfahrungswerte für typische Grundwasserleiter der Schweiz eingesetzt. Daraus ergibt sich dann die Gesamtentnahmerate der Förderbrunnen entlang des Flusses. Entscheidend ist natürlich auch, welcher maximale Absenkungsbetrag im Modell akzeptiert wird, d.h. wann das Kriterium der Nachhaltigkeit als noch erfüllt gilt. Hier wurden 0,25 m gemittelt über die gesamte Fläche des Modellaquifers eingesetzt. Dies liegt im Schwankungsbereich vieler flussgebundener Grundwasserleiter und stellt auch bei dauerhafter Absenkung weder ökologisch noch im

Wasserhaushalt eine signifikante Veränderung dar.

ERGEBNISSE

In *Tabelle 2* sind die Ergebnisse der Abschätzung von Grundwasservolumen und Grundwasserdargebot aufgeführt. Die Unterteilung erfolgte nach Grundwasserleitertyp sowie weiterhin nach Ergiebigkeitsklassen gemäss *Figur 3*. Basiseinheiten sind die Klassen der Hydrogeologischen Karte, die im GIS als Flächen einheitlicher Identität (ID) gekennzeichnet sind [26]. Die Berechnung erfolgte als Integral der erhobenen Daten über die Fläche der jeweiligen Einheit. Die Abschätzung bezieht sich auf einen einmaligen Zustand für mittlere hydrologische Bedingungen eines Jahres. Die zeitliche Entwicklung der Kennwerte kann allenfalls durch langfristige Beobachtung der Grundwasserstände und Quellschüttungen, wie dies landesweit im Rahmen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA geschieht, tendenziell erfasst werden.

GRUNDWASSERVOLUMEN

Das abgeschätzte Gesamtvolumen des Grundwassers in der Schweiz beträgt rund 150 km³ (*Fig. 8*). Während Lockergesteins-Grundwasserleiter einen eher geringen Teil davon ausmachen, entfällt der Hauptanteil auf die Karst-Grundwasserleiter, auch wenn dieser davon abhängt, bis zu welcher Tiefe das Grundwasser

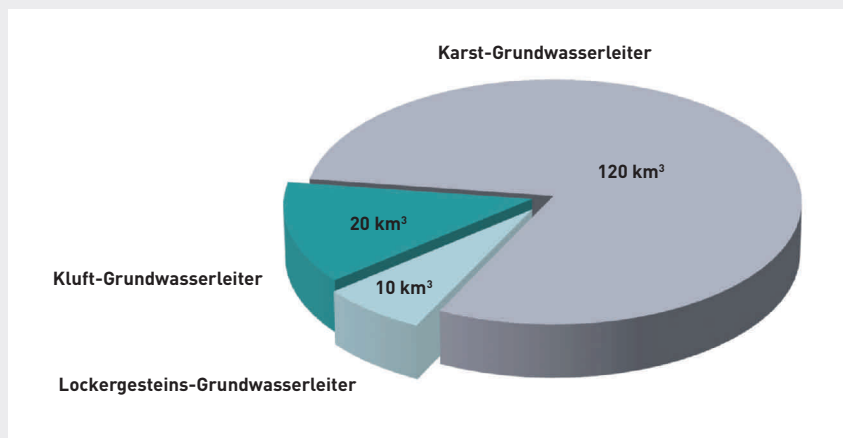


Fig. 8 Anteile der Grundwasserleitertypen am nutzbaren Grundwasservolumen
Volumen d'eaux souterraines utilisables par type d'aquifère

dort als nutzbar und damit als potenzielle Ressource angesehen wird.

Das Volumen in Lockergesteinen beläuft sich auf gut 10 km³. Dazu leisten die sehr ergiebigen Lockergesteinseinheiten innerhalb der Talsohlen und die weniger ergiebigen Einheiten einen etwa gleich grossen Beitrag. Bei Letzteren handelt es sich vorwiegend um Moränen, die zwar in der Regel eine geringe Mächtigkeit, dafür aber eine weite Verbreitung besitzen. Das Grundwasservolumen in Kluft-Grundwasserleitern ist mit insgesamt 20 km³ etwa doppelt so hoch. Davon entfallen ca. 10 km³ auf das Mittelland (hpts. Molasse), 3 km³ auf alpine Gebiete ohne Auflockerung und knapp 6 km³ auf solche mit bedeutender Auflockerungszone (Hakenwurf, Massenbewegungen). Das grösste Grundwasservolumen machen die Karst-

Grundwasserleiter mit 120 km³ aus (Jura 24 km³, Préalpes 8 km³, Helvetikum 46 km³, Penninikum 3 km³, Ostalpin 5 km³, Südalpin 1 km³, und Jura-Südfuss unter Molasse 33 km³). Ausschlaggebend sind hier vor allem die grossen Mächtigkeiten. Mitunter ist dies auch auf die Berücksichtigung tieferer Vorkommen zurückzuführen, auch wenn z.B. die Bereiche unterhalb der Molasse nur mit einem Viertel des Gesamtvolumens in Karst-Grundwasserleitern zu Buche schlagen.

Im Vergleich zur Bestimmung des Grundwasservolumens in Lockergesteinen sind die Berechnungen für die Festgesteine mit wesentlich grösseren Unsicherheiten behaftet. Dies hängt einerseits mit der schlechteren Datenlage, die für einige Parameter nur eine sehr grobe Abschätzung zulassen, andererseits mit der Abhängigkeit von der berücksichtigten Tiefe zusammen. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist wohl innerhalb eines Faktors 2 zu sehen. Die Ergebnisse für die Lockergesteine werden als deutlich belastbarer angesehen.

GRUNDWASSERDARBEIT

Das aus den Erhebungen resultierende nachhaltig nutzbare Grundwasserdargebot der Schweiz beträgt jährlich etwa 18 km³. Für Vorkommen ausserhalb der Talsohlen sind Grundwasserleiter in Lockergesteinen (3,0 km³/Jahr), Kluftgesteinen (3,7 km³/Jahr) und Karstgesteinen (3,8 km³/Jahr) anteilig etwa gleich vertreten (*Fig. 9*). Bei den Lockergesteinen sind dies vor allem die von Moränen geprägten weniger ergiebigen Einheiten. Hinzu kommen noch die Lockergesteins-Grundwasserleiter innerhalb der Talsohlen mit ihrer Anbindung an die Fliessgewässer.

	Fläche km ²	Grundwasser- volumen km ³	Grundwasser- dargebot km ³ /Jahr
Lockergesteins-Grundwasserleiter			
ausserhalb / innerhalb Talsohlen	11 651	10,7	2,96 / 7,56
sehr ergiebig (ID 1, 2)	1088	4,6	- / 2,71
ergiebig (ID 3)	1713	1,6	0,02 / 3,74
weniger bis nicht ergiebig (ID 4, 5, 6)	8850	4,5	2,94 / 1,11
Kluft-Grundwasserleiter			
weniger bis nicht ergiebig (ID 9, 10, 11)	33 289 *	19,8	3,68
Karst-Grundwasserleiter			
ergiebig (ID 8)	7995 * + 3300 **	120	3,79

Tab. 2 Abschätzung von Grundwasservolumen und Grundwasserdargebot inklusive Unterteilung für Einheiten der Lockergesteins-Grundwasserleiter (ID des GIS-Datensatzes [26]), bezogen auf den jeweiligen Flächenanteil in der Schweiz

* Inklusive unter Lockergesteinsbedeckung

** Unter Molassebedeckung bis 1000 m Tiefe

Evaluation du volume et du rendement des eaux souterraines, incluant une subdivision des aquifères poreux (ID des données SIG [26]), rapportés à leurs surfaces respectives en Suisse

* Y compris surfaces au-dessous de roches meubles

** Sous la Molasse, jusqu'à 1000 m de profondeur

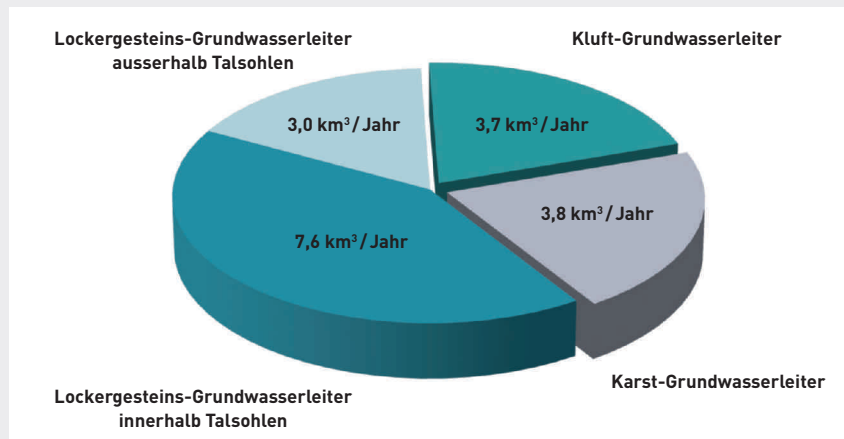


Fig. 9 Anteile der Grundwasserleitertypen am nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebot
Rendement durablement utilisable des eaux souterraines par type d'aquifère

Dabei handelt es sich zum grössten Teil um ergiebige bis sehr ergiebige Vorkommen. Der Beitrag der Lockergesteins-Grundwasserleiter innerhalb Talsohlen ist mit jährlich 7,6 km³ mehr als doppelt so hoch wie der ausserhalb der Talsohlen. Insgesamt tragen so die Lockergesteins-Grundwasserleiter zu mehr als der Hälfte des gesamten Grundwasserdargebots bei. Da das Grundwasserdargebot ausserhalb der Talsohlen für alle drei Grundwasserleitertypen nach demselben Prinzip erhoben wurde, ergibt sich eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Hier wurden die Daten der Quell- und Fassungskataster direkt als nachhaltig nutzbares Grundwasserdargebot interpretiert. Unsicherheiten resultieren vor allem aus der unterschiedlichen Qualität bzw. Vollständigkeit der Kataster. Für die Karst-Grundwasserleiter ist anzumerken, dass Grundwasser z. T. in signifikanter Menge unterirdisch in lokale Lockergesteinsvorkommen übertreten kann [9] und dann bei der Erhebung letzteren zugerechnet wird.

Das Ergebnis verdeutlicht einerseits die Bedeutung der flächenhaften Verfügbarkeit von Grundwasser an Quellen, andererseits das Potenzial flussnaher Förderbrunnen für das Grundwasserdargebot in der Schweiz. Die hohe Ergiebigkeit dieser Grundwasservorkommen ist mitunter auch auf ihre Anbindung an die Flüsse zurückzuführen. Durch induzierte Infiltration von Flusswasser kann das Grundwasserdargebot hier deutlich über der natürlichen Grundwasserneubildung liegen. Deshalb hängt das Ergebnis für das Grundwasserdargebot in Talsohlen – neben der Infiltrationskapazität und einer ausreichenden Restwassermenge im Fluss – vor allem vom maximal akzeptierten Absenkungsbeitrag durch die Förderbrunnen ab.

VERGLEICHSWERTE

WASSERRESERVEN

Neben Grundwasser bestehen die Wasserreserven der Schweiz aus den Seen (Anteil CH 130 km³ [37]), Stauseen (4 km³ [37]) und Gletschern (57 km³ [38]). Unter Einbezug des abgeschätzten Grundwasservolumens betragen die gesamten nationalen Wasserreserven also rund 340 km³ (Fig. 10). Mengenmässig ist das Volumen des Grundwassers in etwa vergleichbar mit dem aller Schweizer Seen, wobei z. B. das Wasser in Lockergesteins-Grundwasserleitern knapp an die Wassermenge im Vierwaldstättersee heranreicht (aufbereitetes Seewasser trägt neben den 80% Grundwasser die restlichen 20% zur öffentlichen Trinkwasserversorgung bei). Im Gegensatz zu den abnehmenden Gletschern haben sich Vorratsänderungen im Grundwasser über Perioden einiger Jahre zum grössten Teil immer wieder ausgeglichen [21].

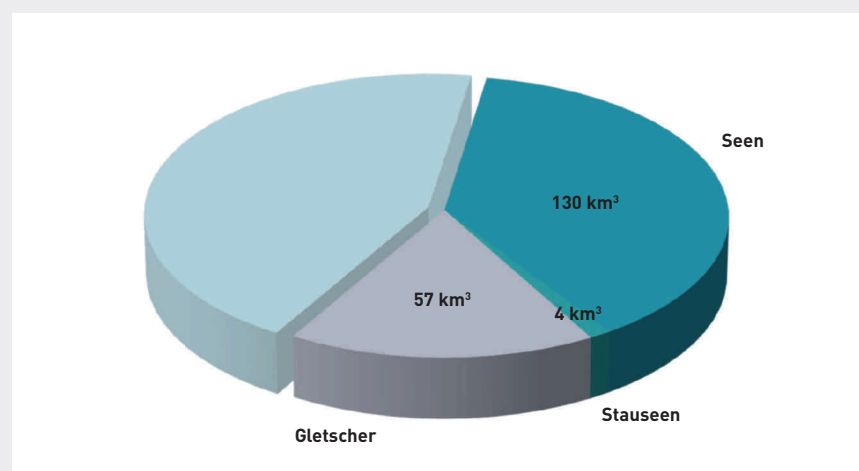


Fig. 10 Anteil des abgeschätzten Grundwasservolumens an den gesamten Wasserreserven der Schweiz

Volume estimé des eaux souterraines par rapport aux réserves d'eau totales en Suisse

Im Untergrund ist das Grundwasser mehr oder weniger flächig verteilt. Würde man diese gespeicherte Wassermenge auf die Oberfläche projizieren, würde sie – gemittelt über die Landesfläche – die Schweiz durchgehend 3,5 m unter Wasser setzen. Dies wiederum entspricht der gesamten Niederschlagshöhe von 2,5 Jahren. Bezogen auf den heutigen Bedarf bzw. die aktuelle jährliche Entnahmemenge aus dem Grundwasser von etwa 1,3 km³ [18, 19] würde das Grundwasservolumen eine theoretische Reserve für über 100 Jahre Wasserversorgung der Schweizer Bevölkerung darstellen.

WASSERNUTZUNG

Der für eine nachhaltige Wassernutzung relevante Kennwert ist allerdings das Grundwasserdargebot. So ist nur ein Anteil von gut 10% (ca. 18 km³) des Grundwasservolumens nicht nur jährlich erneuerbar, sondern kann auch nachhaltig genutzt werden. Im Vergleich dazu stellt dann wiederum die Gesamtentnahme aus dem Schweizer Grundwasser nur einen geringen Anteil dar. Dieser Bedarf an Trink- und Brauchwasser von jährlich etwa 1,3 km³ [18, 19] beträgt nur ca. 7% des nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebots (Fig. 11). Insgesamt könnte also knapp 15-mal mehr Grundwasser gewonnen werden, als tatsächlich entnommen wird. Bezieht man diese Wassermenge auf den heutigen Endverkaufswert des Trinkwassers [39], so ergäbe sich bei vollständiger Realisierung des nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebots ein ökonomischer Wert des Grundwassers von jährlich 30 Milliarden Franken.

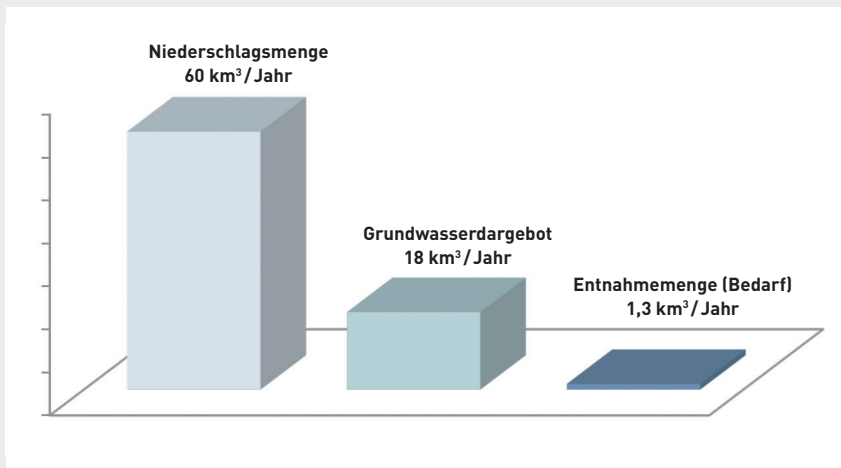


Fig. 11 Vergleich von mittlerer Niederschlagsmenge, Grundwasserdargebot und tatsächlicher Entnahmemenge (Bedarf) von Grundwasser in der Schweiz

Comparison des précipitations moyennes, du rendement des eaux souterraines et de l'exploitation effective (demande) des eaux souterraines en Suisse

Hinsichtlich der Wasserversorgung besteht also – gemittelt über den Jahresverlauf und die ganze Schweiz – bei den Grundwasserressourcen noch ein erhebliches Nutzungspotenzial, welches derzeit mangels Bedarf nicht ausgeschöpft wird. Tatsächlich wird das Grundwasser verbreitet oft nur gering genutzt. Auch in dicht besiedelten Gebieten innerhalb der Talsohlen gibt es teilweise noch beträchtliche Möglichkeiten. Allerdings müssen dabei qualitative und rechtliche Aspekte in Betracht gezogen werden, welche die Nutzung vielerorts einschränken. Lokal und saisonal kann es in Gebieten mit weniger ergiebigen Grundwasservorkommen auch zu Diskrepanzen zwischen Dargebot und Bedarf und damit in einzelnen Fällen zu Mangelsituationen kommen [40]. Es handelt sich dann aber eher um ein Verteilungsproblem, für das Wasserverbundnetze, die auf verschiedene Wasserspeicher (unterschiedliche Grundwasservorkommen, Oberflächenwasser) zurückgreifen, eine Lösung darstellen [41, 42]. Zudem sind solche Situationen mit unzureichendem Grundwasserdargebot nur vorübergehend, da sich die meist oberflächennahen Grundwasserleiter der Schweiz nach Trockenperioden in der Regel rasch wieder erholen.

WASSERHAUSHALT

In der Schweiz fallen jährlich insgesamt etwa 60 km^3 an Niederschlägen (1430 mm), wovon gemittelt über die Fläche etwa ein Drittel wieder verdunstet und zwei Drittel dem ober- und unterirdischen Abfluss zugeführt werden [43]. Jährlich verlässt so ein Nettoabfluss (also ohne Zuflüsse aus

dem Ausland) von 40 km^3 die Schweiz in die grossen Flüsse Europas. Das ermittelte Grundwasserdargebot greift also auf etwa ein Drittel (30%) der gesamten Niederschlagsmenge zurück (Fig. 11). Dies geschieht entweder über die direkte Versickerung oder via oberirdischen Abfluss durch Flusswasserinfiltration. Deshalb beträgt der Anteil des Grundwasserdargebots beinahe die Hälfte des landesweiten Nettoabflusses (45%).

Da in Grundwasserleitern ausserhalb der Talsohlen das Grundwasserdargebot fast ausschliesslich aus flächiger Niederschlagsversickerung erfolgt, liegt es nahe, diese beiden Werte differenzierter miteinander in Beziehung zu setzen. Für einen Vergleich wurden mit Hilfe von Daten zu Niederschlags- [44] und Verdunstungshöhen [45] gemittelte Gesamtabflusshöhen unterteilt nach Regionen berechnet. Daraus ergibt sich, dass das Grundwasserdargebot für die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten zwischen 10% und 40% der dortigen Gesamtabflussmengen beträgt. Zwar gibt es derzeit keine schweizweiten Daten zur Grundwasserneubildung (also dem Anteil des unterirdischen Abflusses am Gesamtabfluss), jedoch wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass gemittelt etwa die Hälfte des Gesamtabflusses dem Grundwasser zugute kommt [41]. Unter dieser Prämisse wären die Anteile des Grundwasserdargebots an der Grundwasserneubildung dann doppelt so hoch wie die auf Basis des Gesamtabflusses berechneten. Die daraus resultierenden Werte liegen im Bereich vergleichbarer Erhebungen [46]. Nur für Karst-Grundwasserleiter geht die

se Rechnung nicht auf, da dort nahezu der gesamte Abfluss unterirdisch erfolgt und zu Grundwasserneubildung führt. Die für diesen Grundwasserleitertyp berechneten 40% des Grundwasserdargebots am Gesamtabfluss gelten also auch in Bezug auf die Grundwasserneubildung. Der Wert erscheint dann zunächst als äusserst gering und ist im Rahmen der Erhebung mit dem häufigen unterirdischen Übertritt in andere Grundwasservorkommen sowie der tendenziell eher unterrepräsentierten Erfassung von Karstquellen in den Katastern zu erklären. So ist auch dieser Wert vor dem Hintergrund der ökologischen Nachhaltigkeit plausibel, da in Karst-Grundwasserleitern die Quellaustritte den gesamten Oberflächenabfluss bilden und damit hinsichtlich einer ausreichenden Restwassermenge in geringerer Masse genutzt werden können als etwa Quellen in Lockergesteins-Grundwasserleitern.

Für eine landesweite Wasserbilanz ist es unerheblich, welches Wasservolumen sich im Untergrund befindet, da mittelfristig ebenso viel Grundwasser abfließt, wie neu gebildet wird [43]. Dennoch kann das Grundwasserdargebot mit dem Grundwasservolumen in Beziehung gesetzt werden, um daraus Verweilzeiten des Wassers im Untergrund abzuleiten. Geht man von einer vollständigen Durchmischung innerhalb der Grundwasservorkommen aus, so entspricht der Quotient aus Grundwasservolumen und Neubildungsrate theoretisch einer mittleren Grundwasserweilzeit zwischen Versickerung und Austritt resp. Entnahme. Wird dies wie im vorliegenden Fall für das Grundwasserdargebot anstelle der Grundwasserneubildungsrate gerechnet, so stellt der Quotient – ausser für die Lockergesteine innerhalb der Talsohlen, wo das Grundwasserdargebot die natürliche Neubildung deutlich übersteigt – Maximalwerte dar. Diese können allenfalls bei Kenntnis des Anteils des Grundwasserdargebots an der Grundwasserneubildung angepasst werden. Für die verschiedenen Einheiten der Lockergesteins-Grundwasserleiter ergeben sich Werte im Bereich von 0,5-2,5 Jahren, für die Kluft-Grundwasserleiter von ca. 5 Jahren und für die Karst-Grundwasserleiter – auch ohne Berücksichtigung der tiefen Bereiche unterhalb der Molasse – von immerhin etwa 20 Jahren. Bezieht man für die Karst-Grundwasserleiter wiederum die grosse Differenz zwischen Grundwasserdargebot und Neubildungsrate mit ein, erhält man dann etwa 8 Jahre Verweilzeit.

Auch dieser Wert erscheint zunächst widersprüchlich zur unmittelbaren Reaktion von Karstquellen auf Niederschlagsereignisse. Es kommt dabei jedoch in der Regel nicht zu einer Durchmischung des gesamten Grundwasservorkommens, insbesondere der Tiefenbereiche, sodass während des Basisabflusses dann auch deutlich langsamere Fließanteile austreten. Insofern erscheinen die Werte für alle drei Grundwasserleitertypen plausibel und stellen damit eine gewisse Validierung der zugrundegelegten Kennwerte dar.

SCHLUSSFOLGERUNG

Einen einzigen Wert zur Beschreibung der Grundwasserressourcen gibt es nicht. Während die Ergiebigkeit ein geeigneter Parameter für die flächenmässige Darstellung ist, kann die mengenmässige Abschätzung über die Kennwerte des nutzbaren Grundwasservolumens sowie des nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebots erfolgen. Damit sind zwei sich ergänzende Aussagen möglich, nämlich wie viel Wasser zur Verfügung steht und wie viel davon genutzt werden kann. Das gesamte im Untergrund der Schweiz gelagerte, theoretisch nutzbare Grundwasservolumen beträgt 150 km³ (ohne Berücksichtigung von Nachhaltigkeit und teilweise nur bedingter derzeitiger Wirtschaftlichkeit der Erschliessung). Das nachhaltig nutzbare Grundwasserdarangebot – d.h. die wasserwirtschaftlich relevantere Grösse – wird auf jährlich 18 km³ beziffert. Diese Werte spiegeln nicht nur die Bedeutung des Grundwassers für die Trinkwasserversorgung wider, sondern verdeutlichen auch dessen besondere Stellung als Wasserreserve der Schweiz. Die einzelnen Ergebnisse sind als grobe Abschätzung zu verstehen. Sie stellen Richtwerte für Betrachtungen auf nationalem Massstab unter Annahme spezifischer Eigenschaften der Grundwasservorkommen in der Schweiz dar. Diese Grundannahmen, welche sich in unterschiedlichem Masse auf das Ergebnis der Abschätzung auswirken, können im Zuge weiterer Plausibilitäts- und Sensibilitätsanalysen überprüft und verfeinert werden. So sind etwa die Bedeutung und das effektive Potenzial tiefer Grundwasserleiter in der Schweiz noch nicht gänzlich klar und sollten mit zunehmender Erkundung des tiefen Untergrunds angepasst werden. Auch sind Aspekte der anthropogenen Beeinträchtigung der Wasser-

qualität in Bezug auf die Nutzbarkeit hier ausgeklammert.

Die Kennwerte können als Ausgangsgrößen für Betrachtungen zum Wasserkreislauf [43], als Entscheidungsgrundlage für übergeordnete Fragestellungen des Grundwasser-Managements [41] und -Monitorings [21], sowie für grossskalige Forschungsstudien [47] herangezogen werden. Derzeit finden sie – als hydrologische Grundlagendaten für eine effiziente und nachhaltige Umwelt- und Ressourcenpolitik – Eingang in nationale Klima- und Wasserstrategien. Aufgrund der weitmöglichst einheitlichen Erhebung und einer recht guten Vergleichbarkeit unter den Grundwasserleitertypen ist auch ein Herunterbrechen auf Teilbereiche im regionalen Massstab entsprechend ihrer relativen Flächenanteile möglich und zulässig.

Die Schweiz verfügt über grosse, nachhaltig nutzbare Grundwasserressourcen für die Wasserversorgung, welche mangels Bedarf bei Weitem nicht ausgeschöpft werden. Hier besteht noch ein hohes Nutzungspotenzial, werden doch heute von den jährlich rund 18 km³ nachhaltig nutzbaren Grundwassers lediglich rund 1,3 km³ entnommen. Vereinzelt saisonale Einschränkungen in der Wasserverfügbarkeit ergeben sich höchstens lokal in Gegenden mit nur kleinen Grundwasservorkommen und ungenügender Vernetzung der Wasserversorgungen, wenn bei längeren Trockenperioden und erhöhtem Wasserbedarf die begrenzten lokalen Grundwasserressourcen vorübergehend zur Neige gehen. Auch im Zuge der Klimaänderung sind keine dramatischen Entwicklungen bei den gesamtschweizerischen Grundwasserressourcen zu erwarten; allenfalls stellt sich die Frage, ob längerfristig das Darangebot in kleinen lokalen Grundwasservorkommen in relevanter Weise abnehmen könnte [48]. Das viel zitierte Wasserschloss wird jedenfalls auch für absehbare Zeit Bestand haben [49]. Insgesamt besitzt die Schweiz ausreichende Grundwasserressourcen, um die Versorgung ihrer Bevölkerung mit Trink- und Brauchwasser auch in Zukunft zu gewährleisten.

DANK

Die Autoren danken *Urs Eichenberger* (SISKA), *Olivier Masset* (ETHZ) und *Christian Milzow* (ETHZ) für die Bearbeitung von Teilbereichen der Erhebung sowie Kollegen des BAFU für die Durchsicht des Manuskripts.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] *Hendricks Franssen, H. et al. (2009): Echtzeitmodellierung der Grundwasserströmung beim Hardhof (Zürich). Gas Wasser Abwasser, gwa 4/09, 267–274*
- [2] *WEA (1999): Grundwasser-Bilanzierung Lockergestein – Übersichtskarte des Kantons Bern. Wasser- und Energiewirtschaftsamt, Bern*
- [3] *AfU Kanton SO (2010): Hydrogeologie Wasseramt – Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung des Grundwassers. Amt für Umwelt, Solothurn, 123 S.*
- [4] *Kantonsrat SG (2012): Grundwasserbewirtschaftung im Kanton St.Gallen. 70 S., www.umwelt.sg.ch/home/Themen/wasser/weitere_informationen/Informationen_Grundwasser/_jcr_content/Par/downloadlist_0/DownloadListPar/download_3.ocFile/Postulatsbericht_Grundwasserbewirtschaftung_Maerz2012.pdf*
- [5] *Leibundgut, C. (2011): Nachhaltige Wassernutzung – Was das NFP 61 dazu beitragen kann. Gas Wasser Abwasser, gwa 12/11, 879–885*
- [6] *BUWAL (2004): Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 141 S.*
- [7] *Spreafico, M.; Weingartner, R. (2005): Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 7, Bern, 137 S.*
- [8] *Schürch, M. et al. (2010): Typisierung von Grundwasserregimen in der Schweiz – Konzept und Fallbeispiele. Gas Wasser Abwasser, gwa 10/10, 955–965*
- [9] *Interreg IIIA (2008): Grenzüberschreitende Bewirtschaftung des Grundwassers im Raum Hegau – Schaffhausen. Interreg IIIA Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein, Abschlussbericht, 85 S.*
- [10] *Hermann, A.; Schumann, S. (2009): Untersuchung des Abflussbildungsprozesses als Kontrollmechanismus für den Gebietswasserumsatz des Oberharzer Einzugsgebiets Lange Bramke. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 53(2), 64–79*
- [11] *Tripet, J.P. (2005): Grundwasser. In: Spreafico, M.; Weingartner, R.: Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 7, 79–100*
- [12] *Sinreich, M. et al. (2009): Konzept der Vulnerabilität im Grundwasserschutz – Anwendung auf die Verhältnisse der Schweiz. Gas Wasser Abwasser, gwa 2/09, 109–217*
- [13] *Matousek, F.; Graf, H. (1998): Trinkwasser und Wärme aus 300 m Tiefe. Gas Wasser Abwasser, 78/1, 3–9*
- [14] *Pochon, A.; Zwahlen, F. (2003): Ausscheidung von Grundwasserschutz zonen bei Kluft-Grundwasserleitern. Praxishilfe, Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 83 S.*
- [15] *GSchG (1991): Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG, SR 814.20).*
- [16] *BAFU (2012): Grundwasserschutz zonen bei Lockergesteinen. Ein Modul der Vollzugshilfe Grund-*

- wasserschutz. Umwelt-Vollzug Nr. 1207, Bundesamt für Umwelt, Bern, 58 S.
- [17] Zechner, E. et al. (2006): Erprobtes Grundwassermodell zur Grundwasseranreicherung und -nutzung. Gas Wasser Abwasser, gwa 9/06, 702–707
- [18] SVGW (2009): Wasserstatistik 2008 – Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz, Betriebsjahr 2008. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW
- [19] Freiburghaus, M. (2009): Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. Gas Wasser Abwasser, gwa 12/09, 1001–1009
- [20] Hoehn, E. et al. (2007): Untersuchungsmethoden der Flussinfiltration – In der Nähe von Grundwasserfassungen. Gas Wasser Abwasser, gwa 7/07, 497–505
- [21] BAFU (2009): Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004 bis 2006. Umwelt-Zustand Nr. 0903, Bundesamt für Umwelt, Bern, 144 S.
- [22] Bitterli, T. et al. (2004): Grundwasservorkommen. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Tafel 8.6, Bundesamt für Umwelt, Bern
- [23] BAFU (2008): Hydrogeologische Übersichtskarte der Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern
- [24] BUWAL; BWG; MeteoSchweiz (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 174 S.
- [25] Schürch, M. et al. (2007): Hydrogeological mapping in Switzerland. Hydrogeology Journal, 15, 799–808
- [26] Bitterli, T. et al. (2007): Grundwasservorkommen. Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500 000, Swisstopo, Bern
- [27] WEA (divers): Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern
- [28] Wyssling, L.; Felber, P. (2007): Geologie und Grundwasservorkommen im Kanton Zug. Baudirektion des Kantons Zug, Amt für Umweltschutz, 156 S.
- [29] Löw, S. et al. (2007): Environmental impacts of tunnels in fractured crystalline rocks of the Central Alps. Selected Papers on Hydrogeology, IAHS-SP 9, 507–526
- [30] Masset, O.; Löw, S. (2010): Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from in-flows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland. Hydrogeology Journal, 18, 863–891
- [31] Thury, M. et al. (1994): Geology and hydrogeology of the crystalline basement of northern Switzerland. Technischer Bericht NTB 93-01, NAGRA, Wettingen
- [32] Lützenkirchen, V.; Matousek, F. (2007): Bergwasser beim Gotthard-Basistunnel – Bisherige Erkenntnisse. Swiss Tunnel Congress 2007, Luzern
- [33] Offerdinger, U. (2001): Ground water flow systems in the Rotondo Granite, Central Alps (Switzerland). Dissertation ETH Zürich Nr. 14108, Geologisches Institut, 198 S.
- [34] Kiraly, L. (1973): Notice et carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel. Bulletin de la Société Neuchâteloise de Sciences Naturelles, 96, supplément
- [35] Pasquier, F. et al. (2006): Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100 000, Vallorbe – Léman nord. Blatt 8, Schweiz. Geotechnische Kommission
- [36] Hessenauer, M.; Flury, F. (2010): Prospection d'eau souterraine par forage profond incliné à Miécourt (Canton du Jura, Suisse). Swiss Bulletin für angewandte Geologie, Vol. 15/1, 23–42
- [37] Schädler, B. (1985): Der Wasserhaushalt der Schweiz. Landeshydrologie Mitteilung Nr. 6, Bundesamt für Umweltschutz, Bern, 83 S.
- [38] Farinotti, D. et al. (2009): An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. Global and Planetary Change, 68, 225–231
- [39] Hartmann, D. et al. (2008): Management des Grundwassers in der Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 0806, Bundesamt für Umwelt, Bern, 40 S.
- [40] Pfändler, M. (2010): Geht der Schweiz das Wasser aus? Zwischen Wasserschloss und Wasserknappheitsszenarien. Geomatik Schweiz, 10/2010, 440–445
- [41] Eawag (2009): Wasserversorgung 2025 – Vorprojekt Standortbestimmung im Auftrag des BAFU. 198 S., www.bafu.admin.ch/wassernutzung/11997/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,lnp6lONTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpjCFe4N5fmyM162epYbg2c_JjKbNoKSn6A-
- [42] Kilchmann, A. (2009): Wasserversorgung – Strategische Planung. Gas Wasser Abwasser, gwa 9/09, 719–726
- [43] Hubacher, R.; Schädler B. (2010): Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Tafel 6.6, Bundesamt für Umwelt, Bern
- [44] Kirchhofer, W.; Sevrük, B. (1992): Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951–1980. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Tafel 2.2, Bundesamt für Umwelt, Bern
- [45] Menzel, L. et al. (1999): Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973–1992. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Tafel 4.1, Bundesamt für Umwelt, Bern
- [46] Harum, T. et al. (2001): Abschätzung des nachhaltig nutzbaren Quellwasserangebots im alpinen Raum Österreichs. Wasserwirtschaftskataster, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 77 S.
- [47] Jeannin, P.-Y. (2012): Améliorer la gestion des ressources en eaux du karst. Aqua & Gas, No 2, 8–9
- [48] Schürch, M. (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser – Erster Bericht der Arbeitsgruppe «Grundwasser und Klima». Gas Wasser Abwasser, gwa 3/11, 177–182
- [49] Schädler, B. (2008): Klimawandel – Geht uns das Wasser aus? Gas Wasser Abwasser, gwa 10/08, 763–769

> SUITE DU RESUMÉ

rendement des eaux souterraines est presque 15 fois supérieur à la demande actuelle en eau en Suisse. Cette évaluation – tout en restant conscient des incertitudes inhérentes à la démarche appliquée – esquisse des valeurs pour chacun des paramètres clés, à disposition pour des analyses à grande échelle.

