

# ANFÄLLIGKEIT GENUTZTER GRUNDWASSERVORKOMMEN GEGENÜBER TROCKENHEIT

## KONZEPT, ANWENDUNG UND MODELLIERUNG

**Die Nachhaltigkeit der Nutzung von Grundwasserressourcen ist insbesondere vor dem Hintergrund zunehmender Trockenperioden essenziell. Eine einfache Abschätzung der Anfälligkeit von Vorkommen in Lockergesteins-Grundwasserleitern gegenüber Trockenheit erfolgt auf Basis von Grundwasserneubildung und Entnahmemenge. Detailstudien mittels Modellierung von Trockenheitsszenarien können zudem konkrete Auswirkungen von Klima- und Nutzungsdruck aufzeigen.**

*Michael Sinreich, Schweizerische Gesellschaft für Hydrogeologie SGH  
Olga Darazs; Eric Di Gioia, CSD Ingénieurs SA*

### RÉSUMÉ

#### VULNÉRABILITÉ D'AQUIFÈRES EXPLOITÉS AUX PÉRIODES DE SÉCHERESSE

Les épisodes de sécheresse toujours plus fréquents doivent nous inciter à porter une attention particulière à l'utilisation durable des ressources en eaux souterraines. L'une des données clés pour comprendre l'effet des changements climatiques sur la quantité d'eau disponible est celle du renouvellement des eaux souterraines. Une démarche mettant en relation les prélèvements opérés dans les nappes phréatiques et la recharge de celles-ci a permis de déterminer les bases hydrogéologiques d'une gestion durable des eaux souterraines en périodes de sécheresse. L'évaluation de la vulnérabilité des aquifères est basée sur la recharge de la nappe phréatique comparée à son exploitation, en considérant que l'équivalent de 20% de la recharge peut être durablement prélevé. Cette démarche a été testée sur une quarantaine d'exemples d'aquifères en roches meubles, dans différents contextes hydrogéologiques en Suisse. La nécessité d'études détaillées sur certains aquifères a été mise en évidence à partir de l'analyse de critères simples. Les résultats, basés sur une modélisation de scénarios de sécheresse, ont permis de mesurer les effets concrets de la pression exercée par les changements climatiques et les prélèvements opérés. La mise en œuvre de la démarche proposée vise à déterminer les ressources en eau durablement disponibles et à assurer une exploitation durable à long terme, y compris en période de sécheresse.

### GRUNDLAGEN

#### AUSGANGSSITUATION

Die nachhaltige Nutzung von Grundwasser als wichtigste Trinkwasserressource und Element einer integralen Bewirtschaftung der Wasserressourcen ist insbesondere angesichts von Klimawandel und zunehmenden Trockenperioden angezeigt. Die Wasserversorgung wird sich dem Klima- und Nutzungsdruck anzupassen haben, ebenso wie die Erkenntnisse zu hydrologischen Veränderungen in gängige Schutz- und Nutzungskonzepte Einzug halten müssen. Mittlerweile werden hydrologische Trockenheit und Niedrigwasser bereits als Naturgefahr angesehen.

Für das Grundwasser liegt die Herausforderung darin, dass die Auswirkungen, denen es unterworfen ist, oft für das Auge unsichtbar bleiben, aber nicht von minderer Bedeutung sind. Ein durch den Bund initiiertes Expertenbericht zum Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz [1] berücksichtigt folglich im Hinblick auf Trockenheit auch hydrogeologische Grundlagen zur nachhaltigen Nutzung der Grundwasservorkommen [2]. Eine entsprechende Vorgehensweise zur Abschätzung der Anfälligkeit von Vorkommen in Lockergesteins-Grundwasserleitern wird im vorliegenden Artikel noch einmal präsentiert. Daneben wurde das Konzept nun auch an gut 40 Einzugsge-

*Kontakt: michael.sinreich@hydrogeo.ch*

bieten getestet sowie durch Modellierung von Trockenheitsszenarien überprüft bzw. ergänzt.

### NACHHALTIGE NUTZUNG

Eine verantwortungsvolle und auf Versorgungssicherheit abzielende Nutzung der Grundwasserressourcen kann nur auf nachhaltige Weise erfolgen. Das nutzbare Grundwasserdargebot ist dabei die verfügbare Wassermenge, die dem Vorkommen über einen längeren Zeitraum entnommen werden kann, ohne dass sich dies auf das mittlere Grundwasservolumen und die Ökosysteme, die von der Speisung aus dem betreffenden Grundwasserleiter abhängig sind, negativ auswirkt.

Mit einem Gesamtvolumen von 150 km<sup>3</sup> und als damit grösstes Wasserreservoir der Schweiz [3] macht Grundwasser 80% der Trinkwasserversorgung aus. Dabei ist etwa die Hälfte durch Pumpbrunnen in untiefen Vorkommen der Lockergesteins-Grundwasserleiter erschlossen. Das Potenzial eines nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebots von landesweit etwa 18 km<sup>3</sup>/Jahr wird derzeit insgesamt betrachtet nur zum Teil ausgeschöpft. Es ist jedoch entsprechend den hydrogeologischen Bedingungen ungleich verteilt, sodass es insbesondere während Trockenperioden lokal und zeitlich begrenzt zu Mangelsituationen kommen kann.

Die Nachhaltigkeit besteht in einem Gleichgewichtszustand zwischen der Verfügbarkeit eines Vorkommens und dem daran geknüpften Wasserbedarf (Fig. 1). Das langfristige Dargebot ergibt sich aus den Komponenten der direkten und indirekten Grundwasserneubildung (hauptsächlich bestehend aus versickerndem Niederschlag und infiltrierendem Oberflächenwasser), allenfalls ergänzt durch künstliche Erhöhung mittels Anreicherung. Ein Ungleichgewicht zwischen Dargebot und Entnahme, vor allem die anhaltende Abnahme des verfügbaren Grundwasserspeichers, stellt eine Übernutzung des Grundwasservorkommens dar.

Eine nachhaltige Nutzung bedingt, dass diese Veränderungen vermieden bzw. minimiert und über einen bestimmten Zeitraum – etwa über das Jahr – ausgeglichen werden und dass zwischenzeitliche Abweichungen nicht zu irreparablen Beeinträchtigungen oder einem Ausfall der Nutzungen führen. Die Grundwasserneubildung bildet demnach den Schlüssel

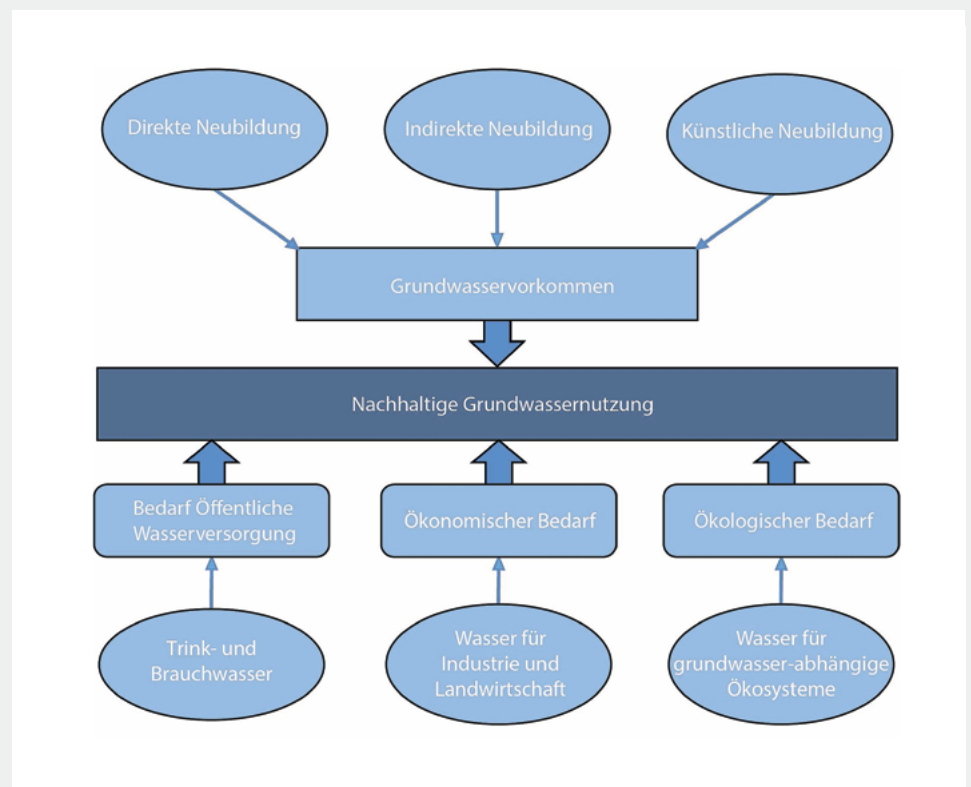


Fig. 1 Grundlegende Faktoren einer nachhaltigen Nutzung der Ressource Grundwasser.

zum Verständnis des Wasserdargebots auch während Trockenperioden. Demgegenüber stehen der diverse Bedarf an Trink- und Brauchwasser sowie an Wasser für ökologische Aspekte.

### KLIMAWANDEL UND TROCKENHEIT

Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und das Grundwasser in der Schweiz wurden im Rahmen von Forschungsprogrammen eingehend untersucht [4, 5]. Zwar wird demnach die Grundwasserneubildung über das Jahr gesehen in etwa gleich bleiben, sich aber mengenmässig in das Winterhalbjahr verlagern [6]. Somit steht im Sommer und Herbst bei geringeren Niederschlägen und erhöhten Temperaturen weniger Grundwasser zur Verfügung. Gleichzeitig werden meteorologische Trockenheiten häufiger und über länger andauernde Perioden auftreten. Da sich diese auf das Grundwasser wegen dessen Verzögerungs- und Speicherfähigkeit weniger direkt auswirken als auf die oberflächlichen Fließgewässer, stellen gerade die Grundwasservorkommen bei hydrologischer Trockenheit eine oft noch verfügbare Wasserreserve dar. Ihre Nutzung steht dann aber mitunter in Konkurrenz zum Basisabfluss der Fließgewässer und dem Bedarf grundwasser-abhängiger Ökosysteme.

Die Trockenereignisse der letzten 20 Jahre haben immer wieder dokumentierte Grundwasser-Tiefststände hervorgebracht. Mittelfristig werden klimabedingt auch die Schnee- und Gletscherschmelze Einfluss auf die Grundwasserregime und damit die saisonale Wasserverfügbarkeit haben. Allerdings erholen sich insbesondere untiefe und rasch reagierende Grundwasservorkommen auch relativ schnell wieder. Bei anhaltendem Neubildungsdefizit oder längeren Reaktionszeiten kann sich eine Normalisierung dagegen in die Länge ziehen.

### KONZEPT

#### PRINZIP UND ZIELSETZUNG

Es wird ein empirisches Vorgehen für durch Pumpbrunnen erschlossene Lockergesteins-Grundwasserleiter hinsichtlich ihrer Anfälligkeit gegenüber Trockenheit vorgestellt. Dieses basiert auf der Betrachtung vergangener Ereignisse sowie der Anwendung eines möglichen Trockenheitsszenarios. Das Konzept stützt sich dabei auf die in Figur 1 skizzierten grundsätzlichen Faktoren einer nachhaltigen Nutzung, indem es das Wasserdargebot der Wasserentnahme gegenüberstellt. Es ermöglicht, gegenüber Trockenheit anfällige Grundwasservorkommen zu identifizieren und

klassifizieren, und damit die Notwendigkeit weiterer Massnahmen abzuklären. Das Konzept zielt auf eine langfristig nachhaltige Nutzung der Grundwasservorkommen auch unter Berücksichtigung von Trockenperioden ab. Dabei wird deren Anfälligkeit immer in Verbindung mit den Nutzungsaspekten betrachtet und definiert. Die Erhebung macht also keine Aussage über die Reaktion des Grundwasservorkommens an sich, sondern stets in Bezug auf dessen Erschliessung bzw. aktuelle oder zukünftige Nutzung. Sie ist für eine Abschätzung im grösseren Massstab und nicht für einzelne Fassungen innerhalb eines Vorkommens gedacht. Damit soll die Ressource als Ganzes betrachtet und Grundlagen für deren integrale Bewirtschaftung geschaffen werden.

**ERHEBUNGSSCHEMA**

**Nachhaltigkeitskriterium**

Das grundlegende Element einer nachhaltigen Nutzung ist der Abgleich von Grundwasserneubildung und Entnahme aus dem Grundwasservorkommen.

Während die Wasserverfügbarkeit bei der Betrachtung einzelner Grundwasserfassungen zur Standardabklärung gehört, spielte sie im regionalen Massstab lange eine untergeordnete Rolle. Die Grundwasser-Bilanzierungskarte für den Kanton Bern aus dem Jahr 1999 ist in diesem Zusammenhang wegweisend [7]. In aktuellen Wasserstrategien und Bewirtschaftungsplänen ist dieser Aspekt mittlerweile etabliert [z.B. 1, 8, 9].

Hier wird nun auf einen Indikator zurückgegriffen, der im Vollzug Anwendung findet. Demnach wird eine Entnahme bis rund 20% der mittleren Grundwasserneubildung als nachhaltig angesehen [10]. Eine Überschreitung dieses Wertes sollte vermieden werden, da sonst spürbare Veränderungen des Grundwasserhaushalts nicht auszuschliessen sind. Das nachhaltig nutzbare Dargebot ist also nur ein Teil dessen, was – wie es das Gewässerschutzgesetz formuliert – dem Vorkommen insgesamt zufließt, und bedeutet wiederum, dass 80% des Wasserdargebots im weitesten Sinn zur Aufrechterhaltung der natürlichen Fließverhältnisse und der Ökosysteme zur

Verfügung bleiben sollten. Auch wenn es sich dabei um einen überschlägigen Erfahrungswert handelt, der in der Realität stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängt, eignet er sich gut für eine erste Grobeinschätzung.

**Entscheidungsablauf**

Konkret werden nacheinander drei Schritte durchgeführt, um die Trockenheitsanfälligkeit abzuschätzen (Fig. 2):

1. Einteilung der Grundwasservorkommen auf Basis der Auswirkungen während Trockenperioden in der Vergangenheit (Mangelkriterium).
2. Mengenmässige Gegenüberstellung der durchschnittlichen Grundwasserneubildung im jeweiligen Vorkommen und der Grundwasserentnahme (Nachhaltigkeitskriterium 20% für Normaljahr).
3. Annahme einer durch Trockenheit verminderten Grundwasserneubildung und abermals Abgleich mit der Entnahmemenge (angepasstes Nachhaltigkeitskriterium für Trockenjahr).

Die Abfolge von Ja- bzw. Nein-Einstufungen bestimmt gemäss Fig. 2 die Klassifizierung und Zuordnung von Massnahmen. Die Erhebung bezieht sich jeweils auf ein gesamtes Vorkommen oder Teilbereiche einheitlicher hydrogeologischer Typologie, jedoch nicht auf einzelne Fassungen. Die jeweiligen Schritte sind im Folgenden im Detail beschrieben.

**Mangelkriterium**

Die Jahre 2003, 2011, 2015, 2018, zuletzt 2022 und auch 2023 stellen Vergleichssituationen für das Verhalten von Grundwasserressourcen während einer Trockenperiode dar. Solche historischen Daten geben einen ersten Hinweis zur Anfälligkeit eines Grundwasservorkommens, nämlich ob es in den Trockenperioden bereits zu quantitativen Defiziten gekommen ist. Dabei sollten neben dem Grundwasservolumen bzw. den Grundwasserständen auch allfällige Auswirkungen auf die oberirdische Wasserfügbarkeit betrachtet werden.

Kriterien für Effekte von Trockenperioden auf das Grundwasser sind insbesondere unzureichende Abflüsse an Quellen und Exfiltrationsstrecken, trockenfallende grundwasser-abhängige Ökosysteme oder auch Pumpbrunnen an der Leistungsgrenze. Im ungünstigsten Fall kann es lokal zu Einschränkungen der

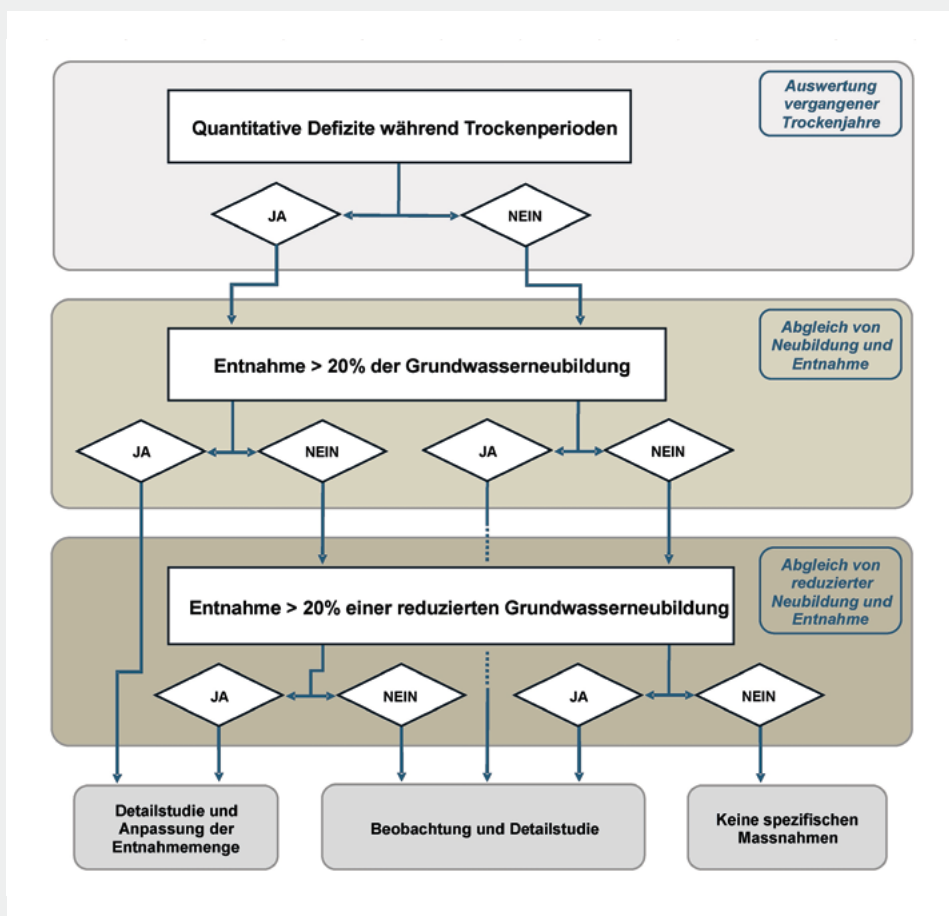


Fig. 2 Konzept und Entscheidungsablauf zur Abschätzung der Anfälligkeit eines Grundwasservorkommens gegenüber Trockenheit sowie Zuordnung entsprechender Massnahmen.

Wasserversorgung aus Grundwasserfassungen kommen, sei es rein mengenmässig als auch hinsichtlich damit einhergehender qualitativer Beeinträchtigungen. Aussergewöhnlich tiefe Grundwasserstände sind ebenfalls ein Anzeichen für quantitative Defizite, sofern sie mit den genannten Effekten in Zusammenhang stehen.

#### Grundwasserneubildung vs. Entnahme

Der zweite Schritt in der Klassifizierung umfasst die Abklärung, ob diese Auswirkungen in Zusammenhang mit einer Übernutzung des Vorkommens stehen. Dazu wird das Nachhaltigkeitskriterium für das Verhältnis von Neubildung und Entnahme herangezogen. Die Wasserbilanz ist das grundlegende Instrument, um das Grundwasserdargebot abzuschätzen. Sie geht aus den Zuflüssen (Neubildung) und den Abflüssen (inklusive Entnahme) eines bestimmten Einzugsgebiets und über eine gegebene Zeitspanne hervor. Die vereinfachte Wasserbilanz eines Grundwasservorkommens bezogen auf ein Normaljahr (d.h. ohne Speicheränderung) ist in *Gleichung 1* zusammengefasst.

$$\begin{aligned} &\text{Versickerung Niederschlagswasser} + \text{Infiltration Oberflächenwasser} \\ &+ \text{Seitenzufluss} + \text{Grundwasser-Zustrom} \\ &= \\ &\text{Exfiltration (inkl. Quellabflüsse)} + \text{Entnahme} + \text{Grundwasser-Abstrom} \end{aligned}$$

Gl. 1

Zur Berechnung des 20%-Kriteriums werden zunächst alle Zuflusskomponenten als Grundwasserneubildung zusammengefasst. Dem gegenüber steht der Wert für die Entnahmen an Pumpbrunnen. Dieser soll alle aktiven Nutzungen umfassen,

allerdings unter Abzug der unmittelbaren Rückgabe geförderter Wassers, wie z. B. bei vielen energetischen Nutzungen oder Bauwasserhaltungen. Entscheidend sind also die tatsächlichen und nicht die konzessionierten Mengen, da letztere nicht der durchschnittlichen Entnahme entsprechen. Die weiteren Abflusskomponenten sind in dieser Berechnung nicht relevant.

#### Trockenheitsszenario

Im dritten Schritt werden besonders ungünstige Verhältnisse der Grundwasserneubildung während eines oder zweier aufeinanderfolgenden Trockenjahren betrachtet. Dafür wird ein vermindertes Dargebot angenommen, nämlich dass – wie es vergangene Trockenperioden nahelegen – mit einer auf das Jahr bezogenen 20%-igen Verringerung der Grundwasserneubildung zu rechnen ist. Insofern kann ein Abgleich der Entnahmen mit einer reduzierten Grundwasserneubildung Hinweise auf mögliche Probleme in Trockenheitssituationen liefern.

Für die Berechnung des angepassten Nachhaltigkeitskriteriums werden also alle Neubildungskomponenten der Bilanz pauschal um 20% reduziert und abermals mit der Entnahme in Bezug gesetzt. Somit steht für dieselbe Nutzung weniger Wasser zur Verfügung. Zudem kann hier in Betracht gezogen werden, dass in Situationen verminderten Dargebots künftig auch mit einem höheren Bedarf an Grundwassernutzung zu rechnen ist, vor allem seitens Landwirtschaft [4]. Insgesamt trägt das Trockenheitsszenario einer reduzierten Grundwasserneubildung dem Umstand Rechnung, dass die nachhaltige Entnahmemenge in Trockenjahren geringer als in Normaljahren ausfällt. Für die Abschätzung der Anfälligkeit eines Vorkommens stellt der Abgleich mit einer reduzierten Neubildung eine Art Sicherheitsmarge dar.

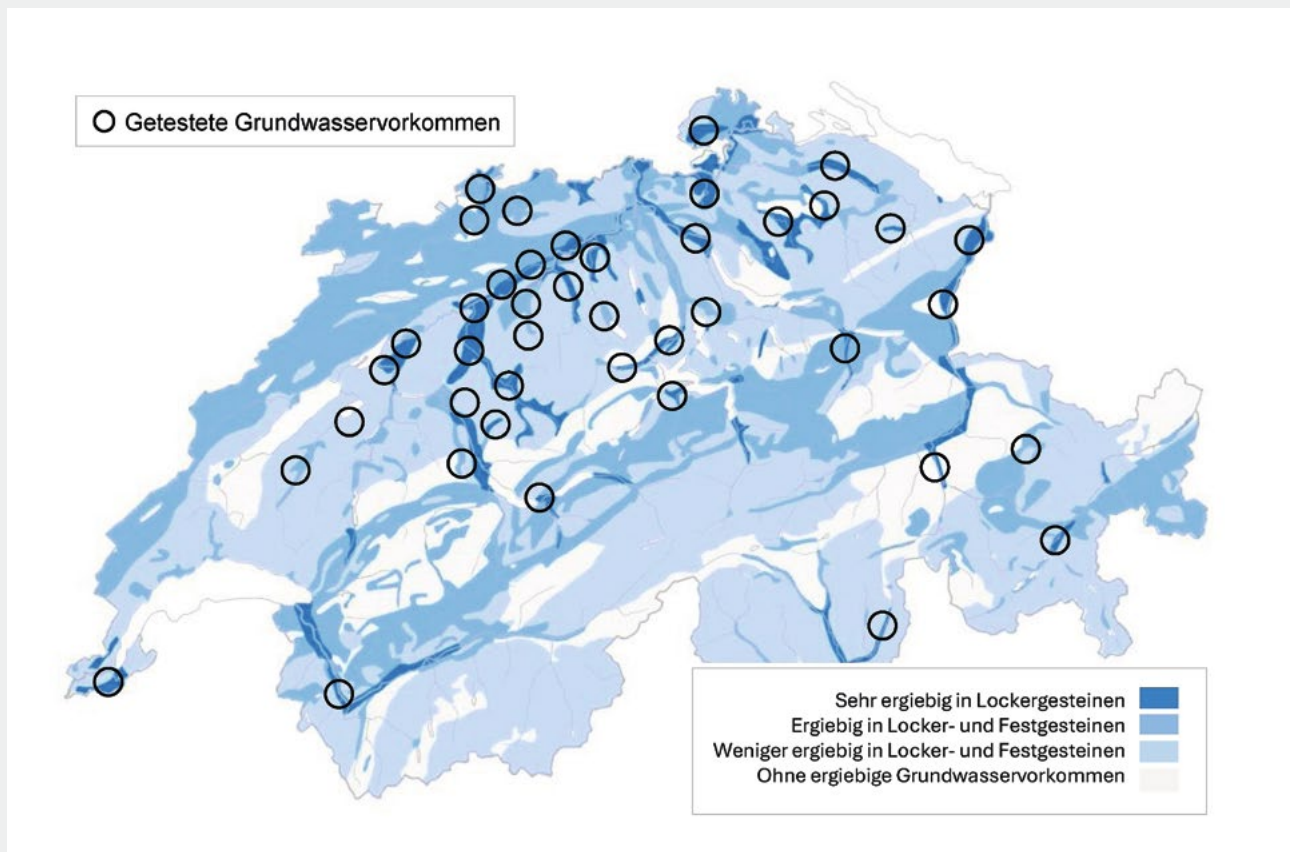


Fig. 3 Lage der 42 getesteten Vorkommen in unterschiedlich ergiebigen Lockergesteins-Grundwasserleitern der Schweiz. Ergiebigkeitsklassen abgeleitet aus [15] im Übersichtsmassstab gemäss [3].

## MASSNAHMEN

Das Ergebnis der Abschätzung liefert Hinweise auf mögliche Mangelsituationen während künftiger Trockenperioden und erlaubt die Beurteilung, ob für die langfristige nachhaltige Nutzung zusätzliche Massnahmen erforderlich sind (Fig. 2). Dazu gehören insbesondere die Beobachtung des Grundwasservorkommens mit dem Fokus auf Trockenheit sowie die Durchführung einer Detailstudie, um die Kenntnisse über das Vorkommen und dessen Bewirtschaftung zu vertiefen. Sind zur Erfüllung des Wasserbedarfs während vergangenen Trockenperioden bereits Defizite aufgetreten, ist auf jeden Fall eine fundierte Abklärung nötig. Wird dabei auch das Nachhaltigkeitskriterium überschritten, besteht prioritärer Handlungsbedarf inklusive der Neueinschätzung bzw. Anpassung von Entnahmemengen. Auch wenn bislang noch keine Mangelsituationen aufgetreten sind, ist bei einer Überschreitung des 20%-Kriteriums von einer Anfälligkeit auszugehen und Detailuntersuchungen sind zu initiieren. Nur falls auch bei verminderter Neubildung keine Überschreitung des Nachhaltigkeitskriteriums festgestellt wurde bzw. zu erwarten ist, sind keine spezifischen Massnahmen erforderlich. Aussagen zu konkreten Effekten während Trockenperioden sind zentraler Teil der nachgelagerten Detailstudie. Diese kann eruieren, inwieweit Beeinträchtigungen während Trockenperioden zu erwarten und welche Wasserentnahmen zulässig sind, um eine nachhaltige Nutzung des Grundwasservorkommens sowohl über

eine Trockenperiode hinweg als auch langfristig zu gewährleisten. Ein repräsentatives und umfassendes Monitoring, welches das gesamte Grundwasservorkommen und dessen Einzugsgebiet abbildet (Grundwasserstände, Abflüsse, Entnahmemengen, Wasserqualität etc.), ist ohnehin Voraussetzung für die Kenntnis und damit adäquate und nachhaltige Nutzung einer Grundwasserressource (inklusive des Antizipierens von Trockenheitseffekten).

## ANWENDUNG

### ANALYSE SCHWEIZ

Im Folgenden wurde das Erhebungskonzept, vor allem das 20%-Kriterium, auf 42 Grundwasservorkommen hauptsächlich des Mittellands und im voralpinen Bereich angewendet und getestet (Fig. 3). Dies betrifft in etwa die Hälfte der insgesamt 58 Lockergesteins-Grundwasserkörper der Schweiz [11]. Die Beispiele decken eine grosse Spannweite unterschiedlich ergiebiger Grundwasservorkommen im hydrogeologischen Kontext des Landes ab, liegen meist jedoch innerhalb von Talsohlen und weisen eine Anbindung an ein Fließgewässer auf.

In erster Näherung reichen für die Umsetzung Kenntnisse über das generelle Wasserdargebot im Einzugsgebiet aus. Nötig sind mittlere Jahreswerte der Grundwasserneubildung sowie der Entnahme an Pumpbrunnen, die im vorliegenden Fall aus Wasserbilanzen konzeptioneller [z. B. 12–14] und numerischer Modelle entnommen wurden. Dabei wurde ver-

sucht, möglichst aktuelle Informationen zur jährlichen Entnahmemenge heranzuziehen. Insbesondere Wasserbilanzen aus Grundwassermodellierungen lassen auch differenzierte Rückschlüsse auf die einzelnen Neubildungskomponenten zu.

## ERGEBNISSE

Die Resultate der Erhebung sind in Fig. 4 gesamthaft wie auch in Bezug auf das Nachhaltigkeitskriterium dargestellt. Die Auswertung zeigt, dass die betrachteten Grundwasservorkommen in ihrer Mehrheit innerhalb des 20%-Kriteriums liegen. Nur knapp ein Viertel der getesteten Vorkommen überschreitet diese theoretische Grenze, wenn auch in den meisten Fällen nicht drastisch. In einigen weiteren Fällen führt erst die Berücksichtigung der reduzierten Neubildung zu einer Überschreitung. Im Mittel aller Vorkommen liegt der Anteil der Entnahme an der Neubildung bei Werten von 16% (durchschnittliche Neubildung) respektive 20% (reduzierte Neubildung).

Ein Zusammenhang zwischen Trockenheitsanfälligkeit und Gesamtdargebot und damit Ausmass der Vorkommen bzw. deren Ergiebigkeit ist nicht erkennbar. Dies lässt sich mit der hier vorgenommenen Definition von Anfälligkeit und der damit einhergehenden Aussage der resultierenden Werte begründen. So stehen in grossen, ergiebigen Vorkommen zwar ein höheres Dargebot und Wasservolumen zur Verfügung, dort befinden sich aber oft auch die bedeutenden Nutzungen.

Da es sich beim 20%-Kriterium nur um einen Anhaltspunkt bzw. Indikator han-

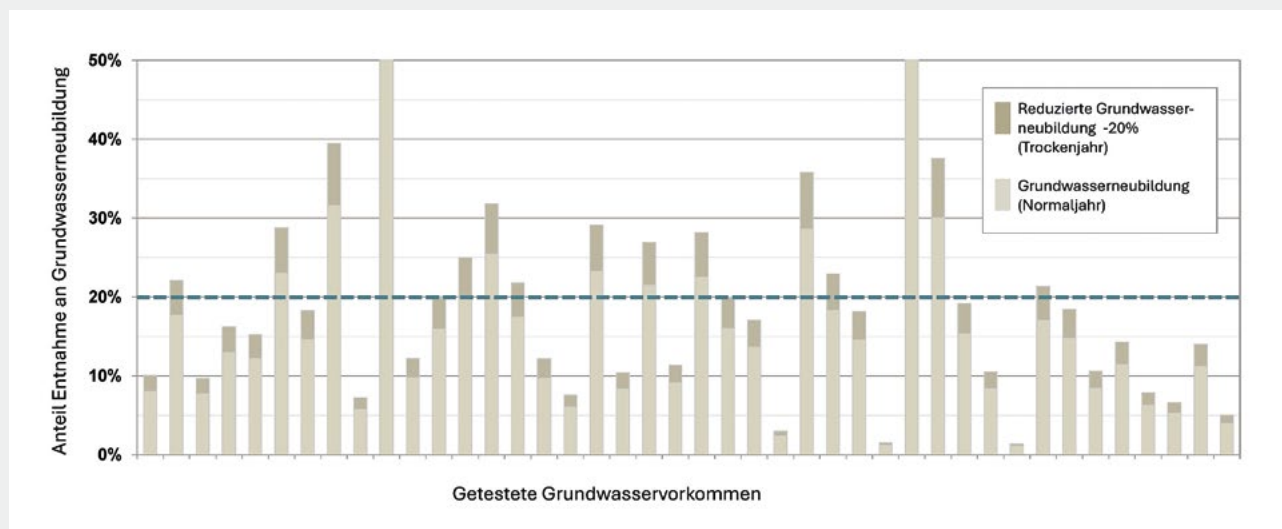


Fig. 4 Ergebnisse des Abgleichs von Grundwasserneubildung und Entnahmemenge für die getesteten Vorkommen der Fig. 3, jeweils für durchschnittliche und reduzierte Neubildungswerte. Es wird Bezug genommen auf das 20%-Kriterium für eine nachhaltige Nutzung. Sortierung nach zunehmendem Wasserdargebot der Einzugsgebiete von links nach rechts.

delt, bedeutet dessen Überschreitung auch nicht per se eine Übernutzung des Vorkommens oder Gefährdung der Nutzung. Vielmehr würde sich eine solche Schlussfolgerung erst aus einer entsprechenden Detailstudie ergeben. Die Ergebnisse erlauben jedoch bereits Rückschlüsse auf die jeweilige Relevanz verminderter Neubildung und geben Hinweise auf die Einstufung der Anfälligkeit. Teilweise stimmen die Überschreitungen mit Fällen überein, in denen es in der Vergangenheit bereits zu Problemen bzw. Defiziten bei der Wasserversorgung kam. Das Mangelkriterium ist aber auch für manche Vorkommen erfüllt, die innerhalb der Nachhaltigkeitsgrenze liegen.

### INTERPRETATION

Die hydrogeologischen Faktoren, welche die Reaktion eines Grundwasserleiters während Trockenperioden beeinflussen, sind ausführlich beschrieben [6, 16]. Darunter fallen neben der Art der Neubildung und der Anbindung an bzw. Wechselwirkung mit Fliessgewässern auch die ungesättigte Zone, Grösse und Speicherfähigkeit des Grundwasserleiters (mitunter subsummiert als Ergiebigkeit [15]; siehe *Fig. 3*) sowie etwa Seitenzuflüsse aus Festgestein [17]. Sensitivitätsabschätzungen, wie sie für Fliessgewässer gemacht wurden [18], können ebenso Grundwasservorkommen charakterisieren [16, 19], obgleich eine umfassende Typologie dort immer noch aussteht.

Mit der vorliegenden Auswertung können diese Einflussfaktoren allenfalls nur indirekt in Beziehung gesetzt werden, da die Ergebnisse der Studie eben als eine Anfälligkeit in Bezug zur Entnahme zu verstehen sind. Die Trockenheitseffekte werden lediglich unspezifisch in Form einer pauschal reduzierten Grundwasserneubildung berücksichtigt. Dagegen lassen sich die vorgängig genannten Einflussfaktoren mit Mangelsituationen abgleichen, sofern letztere nicht allein durch unzureichende Brunneninfrastruktur bedingt sind. Bei den beiden Fällen in *Figur 3* mit Anteil Entnahme an Grundwasserneubildung > 50% handelt es sich im Übrigen um von künstlicher Neubildung dominierte Fliesssysteme.

Mitunter kann es aufschlussreich sein, Teilbereiche getesteter Grundwasservorkommen – wo hydrogeologisch sinnvoll – getrennt voneinander zu betrachten. So hat sich unter den getesteten Vorkommen des Öfteren im oberstromigen Bereich

ein ungünstigeres Verhältnis zwischen lokalem Dargebot und Entnahme gezeigt als talwärts trotz der dortiger Nutzungsschwerpunkte. Grund dafür dürften Unterschiede in den Exfiltrations- und Infiltrationsstrecken sein sowie der Anteil von Seitenzuflüssen an der Grundwasserneubildung. Je nach Erschliessungssituation und hydrogeologischen Verhältnissen kann auch der gegenteilige Effekt auftreten.

Ähnliches gilt für flussnahe und flussferne Bereiche eines Vorkommens hinsichtlich der Wechselwirkung von Grund- und Oberflächenwasser. In flussgebunden Grundwasservorkommen kann die Flussinfiltration einen beträchtlichen Anteil an der Neubildung ausmachen, in den betrachteten Beispielen bis über 50%. Induzierte Infiltration, d.h. zusätzliches Anziehen von Flusswasser durch den Pumpbetrieb, kann das Dargebot noch weiter erhöhen [3, 20]. Mitunter sind in Wasserbilanzen aus Grundwassermodellen entsprechend erhöhte Infiltrationsraten schon subsummiert. Oft ist dann der Abfluss des infiltrierenden Fliessgewässers der limitierende Faktor, was insbesondere während Trockenperioden relevant ist.

## TROCKENHEITSMODELLIERUNG

### DETAILSTUDIE

Nachfolgend zum übergeordneten Ansatz muss bei Bedarf eine Detailstudie zur Nutzung bei Trockenheit erstellt werden. In Trockenperioden wird häufig verstärkt Grundwasser entnommen, während sich gleichzeitig die Neubildung vermindert. Dies führt über einen gegebenen Zeitraum unweigerlich zu einer Abnahme des verfügbaren Volumens.

Zu einer Detailstudie gehören die Erstellung eines konzeptionellen Modells des Grundwasservorkommens bzw. einer detaillierten Wasserbilanz, die Bestimmung der Veränderung des Grundwasserspeichers, der Einbezug eines Referenzszenarios sowie die Auswertung des hydrogeologischen Ansprechens auf Trockenperioden. Grundwassermodelle können unter Berücksichtigung von Trockenheitsszenarien solche Informationen liefern [21].

### DATEN UND INFORMATIONEN

Bei der Erstellung eines Strömungsmodells fliessen in der Regel alle verfügbaren Daten zu hydrogeologischen

Untergrundverhältnissen, Grundwasservolumen und Schwankungen des Grundwasserstands sowie Neubildungs- und Entnahmekomponenten ein. Somit sind die Prozesse und Wechselwirkungen bereits quantitativ erfasst. Diese können dann auf die gewählten Klima- und Nutzungsszenarien angewendet werden.

Die mittlere langjährige Wasserbilanz bzw. die eines Normaljahres bildet den Referenzzustand für die Simulation von Trockenheitssituationen. Während bei der Basiserhebung pauschal von einer um 20% verringerten Grundwasserneubildung ausgegangen wird, können im Modell zeitaufgelöste Szenarien eingesetzt werden. Mit Niederschlags- und Temperaturverteilungen vergangener Trockenperioden, oder auch Vorhersagen diverser Klimamodelle, sind dann realitätsnahe Varianten möglich.

Aus der Modellierung von Trockenheitsszenarien sowie allfälliger Nutzungsszenarien resultieren Aussagen zum Gang der Veränderungen in der Grundwasserneubildung, Speicheränderungen, oder auch Zeitpunkt und Ausmass von Grundwasser-Tiefstständen.

### UMSETZUNG

#### Modellierungsszenarien

Um das Erhebungskonzept sowie das Instrument der Grundwassermodellierung für die Abschätzung der Trockenheitsanfälligkeit zu illustrieren, wurden beide an zwei gegensätzlichen Vorkommen des Mittellandes angewendet. Die Einzugsgebiete unterscheiden sich in Grösse, Ergiebigkeit, hydrogeologischen Gegebenheiten und letztlich ihrer Anfälligkeit gegenüber Trockenperioden.

In beiden Fällen wurden auf Basis bereits vorliegender Grundwassermodelle (FEFLOW) Trockenheitsszenarien simuliert. Die Modellierung erfolgte instationär über zwei Jahre unter der Annahme aufeinanderfolgender Trockenjahre. Während sich die Neubildung aus Niederschlag, Seiten- und Profilzuflüssen direkt aus den Trockenheitsszenarien ergibt, wird die Flussanbindung in Abhängigkeit dieser Parameter modelliert. Dabei ist auch der jeweilige Oberflächenwasserabfluss dynamisch berücksichtigt. Die Entnahmemenge aus den Pumpbrunnen wurde ebenso variabel gestaltet. Zunächst wurde eine 20%-ige Reduzierung der direkten Neubildungskomponenten simuliert und diese mit Szenarien

spezifischer Trockenjahre der Vergangenheit verglichen (bezogen auf ein normales Referenzjahr). Dafür wurden Kombinationen der Trockenjahre 2011 und 2018 (Szenario 4029) bzw. zweimal das Trockenjahr 2011 (Szenario 4022) herangezogen. Für die einzelnen Szenarien sind jeweils als Ergebnisse der Modellierung die maximale Absenkung des Grundwasserstandes über das Einzugsgebiet sowie

die zeitliche Entwicklung des Grundwasserspeichers und die Bilanzkomponenten im zweiten Trockenjahr in den *Figuren 5* und *6* dargestellt.

Beispiel: Anfälliges Grundwasservorkommen  
Es handelt sich hier um ein lokales Vorkommen von knapp 5 km<sup>2</sup> mit gut durchlässigen, aber im Mittel nur bis 10 m mächtigen Ablagerungen, das durch

mehrere Pumpbrunnen wie auch Quelfassungen erschlossen ist (*Fig. 5*). In der Basiserhebung erweist es sich als anfällig gegenüber Trockenheit (Entnahme > 20% der Neubildung). So wurde während Trockenperioden, etwa 2018, von Einschränkungen bei den bestehenden Pumpbrunnen ebenso wie bei den Quelfassungen berichtet.

Im Vergleich zeigt sich eine Diskrepanz zwischen den getesteten Szenarien. Während das Szenario -20% wenig Einfluss auf das vorhandenen Grundwasservolumen hat, zeigt Szenario 4029 im ersten Trockenjahr eine deutliche Abnahme. Diese Situation normalisiert sich über den Winter und wiederholt sich im Folgejahr. Die mittlere Absenkung des Grundwassers bewegt sich zwar nur im Meter-Bereich, kann sich aber in den Pumpbrunnen signifikant auswirken.

Das Dargebot nimmt im Szenario 4029 gegenüber der Referenz um ca. 25% ab und liegt damit im Bereich der Grundannahme des Konzepts. Schliesslich wurde mit dem Szenario 4029 Q+20% dem Umstand Rechnung getragen, dass in Trockenperioden der Wasserbedarf und damit die Entnahme zunehmen können. Dies hat aber nur noch geringen Einfluss auf die Grundwasserstände.

Die Erstellung des Grundwassermodells ist bereits eine der von der Wasserversorgung eingeleiteten Massnahmen. Die Simulation der Trockenszenarien liefert weitere Anhaltspunkte, auch hinsichtlich konkreter Auswirkungen auf die Pumpbrunnen. Zudem wird erwogen, das Grundwasservorkommen über tiefere Brunnen zu erschliessen.

Beispiel: Wenig anfälliges Grundwasservorkommen

Beim zweiten Beispiel handelt es sich um ein sehr ergiebiges Grundwasservorkommen regionaler Bedeutung mit einer Modellierungsfläche von ca. 150 km<sup>2</sup> (*Fig. 6*). Es ist durch eine Vielzahl von Brunnen mit einer mittleren Entnahmemenge von insgesamt gut 1 m<sup>3</sup>/s erschlossen. Dies entspricht etwa 10% des regional nutzbaren Dargebots, wodurch die Entnahmemenge unter Einhaltung des Nachhaltigkeitskriteriums ziemlich genau verdoppelt werden könnte. Dies wurde dann für alle Modellierungsszenarien so angenommen (Szenario 2Q), um die Effekte an dieser Grenze zu testen.

Die Verdopplung der Entnahme allein wirkt sich bei der Simulation kaum auf

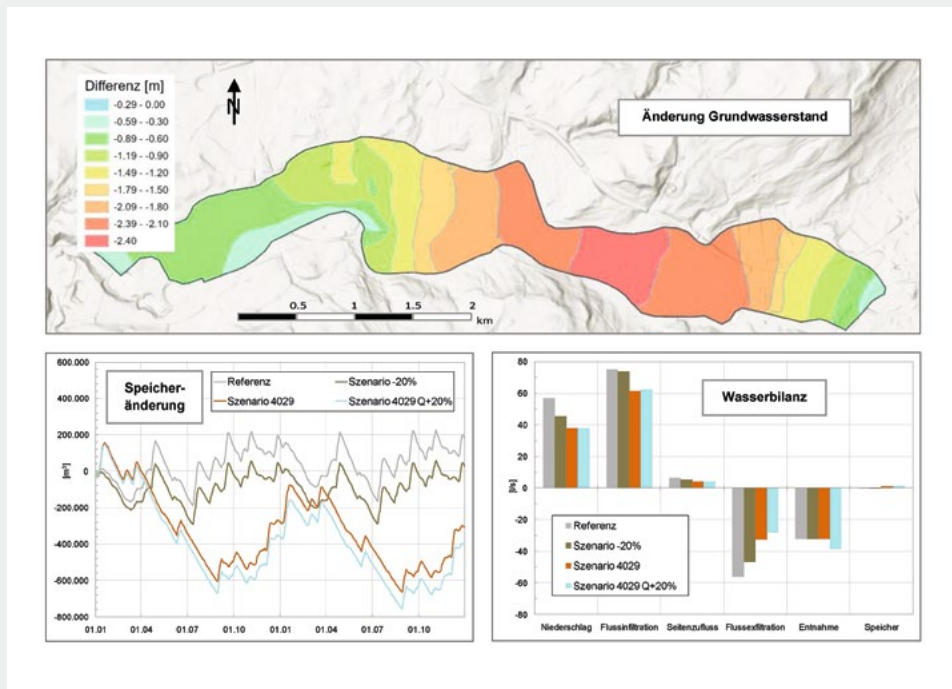


Fig. 5 Resultate der Modellierung eines lokalen Grundwasservorkommens mit hoher Anfälligkeit gegenüber Trockenheit.

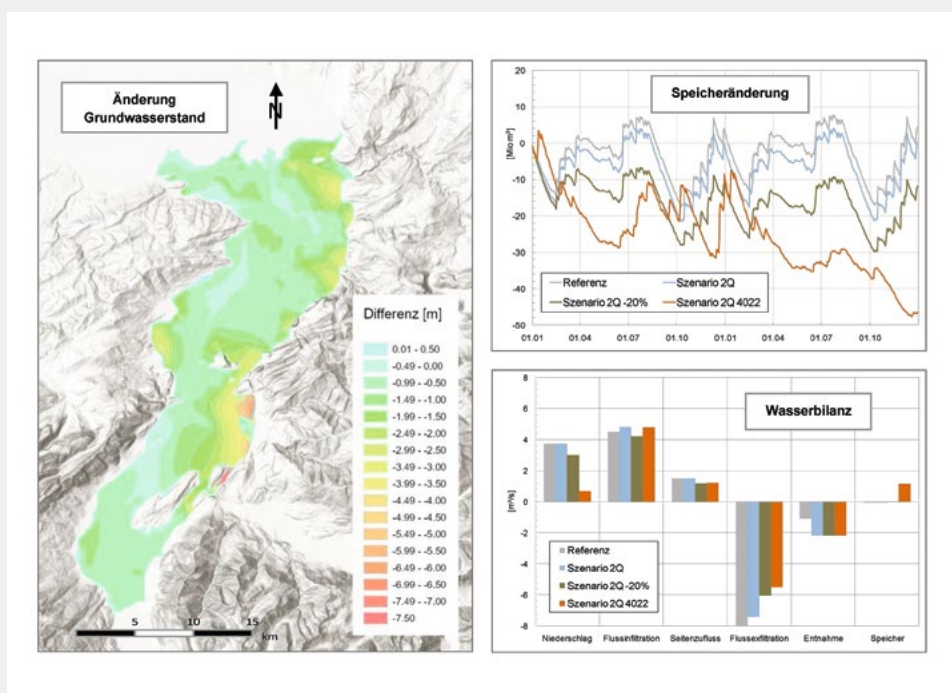


Fig. 6 Resultate der Modellierung eines regionalen Grundwasservorkommens mit geringer Anfälligkeit gegenüber Trockenheit.

Grundwasserstand und Speicheränderung aus, da dadurch – bei nahezu gleichbleibender Infiltration – vorrangig die Exfiltrationskomponente in den Fluss abnimmt. Auch spricht das Vorkommen insgesamt weniger rasch und deutlich auf die modellierten Trockenheitssituationen an. Dies steht im Einklang mit der Einstufung aus der Basiserhebung.

Während die beiden Trockenheitsszenarien im ersten Modellierungsjahr noch relativ ähnliche Absenkungsbeträge generieren, kommen im zweiten Jahr für das Szenario 2Q 4022 kumulative Effekte zum Tragen. In diesem Fall wird bei kontinuierlicher Abnahme das Minimum des Grundwasservolumens erst am Ende des zweiten Trockenjahres erreicht. Trotz doppelter Entnahme kommt es aufgrund der hohen Ergiebigkeit – ausser lokal in Randbereichen des Vorkommens – flächig lediglich zu geringen Absenkungen, in den Pumpbrunnen selbst nur im Dezimeterbereich.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

### KONZEPT

Die Erhebungsmethodik betrachtet genutzte Grundwasservorkommen sowohl von der Dargebots- als auch der Nutzungsseite und erlaubt auf Basis einfacher Kriterien eine entsprechende Abschätzung deren Anfälligkeit gegenüber Trockenheit. Zudem werden die Vorkommen im Sinne eines Screenings hinsichtlich notwendiger Detailuntersuchungen zu ihren hydrogeologischen Eigenschaften eingestuft, um so das Ansprechen auf Trockenperioden und die konkreten Auswirkungen besser zu verstehen.

Das Nachhaltigkeitskriterium von 20% als Anteil der Entnahme an der Grundwasserneubildung erwies sich als empirischer Richtwert in der Anwendung der Methodik als geeignet. Auch wenn jedes Vorkommen letztlich fallspezifisch betrachtet werden muss, kann es als Anhaltspunkt und erste Einstufung der nachhaltigen Nutzung – auch unter Trockenheitsbedingungen – dienen. Sowohl die Anwendung auf verschiedene hydrogeologische Situationen der Schweiz als auch die Modellierungsergebnisse bestätigen die Plausibilität dieses Kriteriums. Grenzen sind der Machbarkeit und Umsetzung – vor allem ausserhalb der grossen, recht gut dokumentierten Talgrundwasserleiter – durch mangelnde Datenverfügbarkeit gesetzt. Ein speziel-

les Manko stellen dabei verlässliche Angaben zu den tatsächlichen Entnahmemengen sämtlicher Wassernutzungen dar, und zwar über einzelne Fassungen hinaus für die Gesamtheit der Ressource; Konzessionsmengen sind hierbei nicht ausreichend. Letztlich sollten die erforderlichen Werte einer abgeschätzten (zumindest semi-quantitativen) Wasserbilanz für alle genutzten Grundwasservorkommen standardmässig bekannt und die Datenmodelle in dieser Hinsicht sukzessive erweitert werden.

### MODELLIERUNG

Die Modellierung von Trockenheitsszenarien eignet sich sowohl zur Validierung des präsentierten Ansatzes als auch für die darauffolgende Detailstudie. Die aufgeführten wie auch weitere Modellierungen stützen zwar das Konzept, verdeutlichen aber gleichzeitig, dass der Richtwert der Basiserhebung nur der Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen sein kann. Im Einzelfall können bei realistischer Abschätzung die Auswirkungen auf anfällige Vorkommen deutlich davon abweichen.

Während für die Wasserbilanz langjährige Mittelwerte ausreichen, sind für die Trockenheitsmodellierung instationäre Bedingungen zu betrachten. Die Simulation von zwei aufeinanderfolgenden Trockenjahren, evtl. mit spezifischer Neubildungsverteilung über das Jahr, erhöht die Robustheit der Aussage und widerspiegelt realistische Szenarien, wie z.B. die Folge der Jahre 2022 und 2023. Auch die Berücksichtigung einer mit Trockenperioden einhergehenden Abnahme der Oberflächenwasser-Abflüsse bzw. allfälliger mittelfristiger Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserregime sind angebracht. Mittlerweile liegen auch hydrologische Szenarien vor, die für eine solche Modellierung herangezogen werden können [22].

Die quantitative Kenntnis um konkrete Auswirkungen von Trockenperioden auf die Grundwasserressourcen und das Mass der Anfälligkeit liefern die Grundlage einer adäquaten Anpassung der Wasserversorgung. Durch Einbezug z.B. der landwirtschaftlichen Bewässerung oder von Erschliessungspotenzialen können solche Modelle erweitert werden [23, 24]. Mit den Ergebnissen sind Grundlagen zur Bewirtschaftung und einer nachhaltigen Grundwassernutzung möglich, etwa in Bezug auf Brunnenausbau, erwartete Ab-

senkungen oder auch Restwassermengen in angebundenen Fliessgewässern.

### BEWIRTSCHAFTUNG

Die ausgewählten Vorkommen liegen im Grossen und Ganzen innerhalb der Nachhaltigkeitsgrenzen. Dies ist sicher auf eine insgesamt nachhaltige Nutzung unter Aufsicht der Kantone zurückzuführen, mag im vorliegenden Fall aber teilweise auch der Auswahl der Einzugsgebiete geschuldet sein. Alles in allem spricht es – in Kombination mit Risikominderung durch unterschiedliche Standbeine – für eine hohe Versorgungsresilienz der Schweiz in Bezug auf Trinkwasser sowie Brauchwasser für industrielle, landwirtschaftliche und energetische Zwecke [25]. Hervorzuheben bleibt, dass eine Überschreitung des Nachhaltigkeitskriteriums nicht automatisch mit einer Übernutzung gleichzusetzen ist. Eine diesbezüglich festgestellte Anfälligkeit muss nicht unbedingt mit Problemen verbunden sein. Es ist an den Bewirtschaftern und Vollzugsstellen, die Schwellenwerte zu kennen und zu definieren, deren Überschreitung durch eine bei Trockenheit vorübergehende Absenkung der Grundwasserstände und der Wasserverfügbarkeit nicht mehr tolerierbar ist. Die Steuerung der Entnahme, inklusive induzierter Infiltration und unter allfälliger künstlicher Neubildung, ist dann die Stellschraube zur Bewirtschaftung der Grundwasservorkommen.

Die Bestandsaufnahme bereits bekannter und genutzter Grundwasservorkommen ist dabei nur ein erster Schritt. Ziel muss

### DANK

Diese Studie wurde im Rahmen der Arbeitsgruppe «Grundwasser als Element im integralen Wassermanagement» der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie SGH erstellt. Die Autoren danken deren Mitgliedern für die Zusammenarbeit, Kollegen aus Ingenieurbüros (insbesondere *TK Consult AG*, *AFRY Schweiz AG*, *Simultec AG* und *CSD Ingénieurs SA*), diversen kantonalen Fachstellen und der Wissenschaft für Daten zu den Grundwasserbilanzen, sowie dem Bundesamt für Umwelt BAFU für die Unterstützung. Die Datenherren der Grundwassermodelle haben diese freundlicherweise zur Simulation der Trockenheitsszenarien überlassen. Die Modellierungen selbst wurden von der *Simultec AG* durchgeführt.

einerseits die ausreichende Kenntnis der gesamten Grundwasserressourcen (inklusive potenzieller Reserven) sein und andererseits deren dynamische und integrale Bewirtschaftung unter Berücksichtigung der Entwicklung der hydrogeologischen Verhältnisse und aller Nutzungen. Nur so ist es möglich, negative Tendenzen frühzeitig zu erkennen, ihnen entgegenzuwirken und sich den Veränderungen durch den Klimawandel anzupassen.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Chaix, O. et al. (2016): Bestimmung von Regionen mit Handlungsbedarf bei Trockenheit. Expertenbericht zum Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU, 51 S. + 12 Anhänge
- [2] Darazs, O. et al. (2016): Bestimmung der nachhaltig verfügbaren Grundwasserressourcen. Expertenbericht zum Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz, Anhang e). CSD Ingénieurs SA im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU, 13 S.
- [3] Sinreich, M. et al. (2012): Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. *Aqua & Gas* 9/2012: 16–28
- [4] Björnsen Gurung, A.; Stähli, M. (2014): Wasserressourcen der Schweiz: Dargebot und Nutzung – heute und morgen. *NFP 61 Nachhaltige Wassernutzung, Thematische Synthese 1*, 69 S.
- [5] BAFU (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. *Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Umwelt-Wissen Nr. 2101*, 140 S.
- [6] Hunkeler, D. et al. (2021): Effect of Climate on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland. *Hydro-CH2018 Project. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU*, 80 S.
- [7] WEA (1999): Grundwasser-Bilanzierung Lockergestein. *Übersichtskarte des Kantons Bern. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern*
- [8] Kantonsrat SG (2012): Grundwasserbewirtschaftung im Kanton St.Gallen. 70 S.
- [9] AfU SO (2022): Wasserversorgung Solothurn 2030 – Teilstrategie Birs. 23 S.
- [10] BAFU (2012): Grundwasserschutz zonen bei Lockergesteinen – Ein Modul der Vollzugshilfe Grundwasserschutz. *Umwelt-Vollzug Nr. 1207*, 58 S.
- [11] Sinreich, M. et al. (2023): Grundwasserkörper der Schweiz – Erhebungskonzept und Anwendungsbereiche. *Aqua & Gas* 6/2023: 44–52
- [12] Epting, J. et al. (2020): Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. *Hydro-CH2018 Project. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU*, 118 S.
- [13] De los Cobos, G. (2012): L'eau sans frontière – Quarante ans d'une gestion partagée de la nappe d'eau souterraine du Genevois. 200 S.
- [14] Epting, J.; Huggenberger, P. (2016) Flussnahe Trinkwasserfassungen. *Regionale Wasserversorgung Basel-Landschaft* 21. 147 S.
- [15] Bitterli, T. et al. (2004): Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500'000. Blatt 8.6 Grundwasservorkommen. *Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES. Bundesamt für Umwelt BAFU*
- [16] Hunkeler, D. et al. (2014): Klimaeinflüsse auf Grundwassermengen. *Aqua & Gas* 11/2014: 42–49
- [17] Carlier, C. et al. (2018): Geology controls streamflow dynamics. *Journal of Hydrology* 566: 756–769
- [18] Weingartner, R. et al. (2021): Wie anfällig sind Fließgewässer auf Trockenheit? *Aqua & Gas* 4/2021: 30–38
- [19] Christe, P. et al. (2013): Global warming in the Alps: vulnerability and climatic dependency of alpine springs in Regione Valle d'Aosta (Italy) and Canton Valais (Switzerland). *European Geologist*, 35: 64–69
- [20] Hoehn, E. et al. (2007): Untersuchungsmethoden der Flussinfiltration – In der Nähe von Grundwasserfassungen. *GasWasserAbwasser, gwa* 7/2007: 497–505
- [21] Gmünder, C. et al. (2021): Modellierung der Auswirkungen einer möglichen Bewässerung auf den Wasserhaushalt im Klettgau. *Swiss Bulletin für angewandte Geologie* 26/2: 31–44
- [22] Hüsler, F. et al. (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf die Oberflächengewässer und das Grundwasser in der Schweiz. *Swiss Bulletin für angewandte Geologie* 26/2: 55–62
- [23] Holzkämper, A. et al. (2020): AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. *Agroscope, Universität Bern, Universität Neuenburg*. 38 S.
- [24] Gmünder, C. et al. (2023): WasserZukunft Klettgau – Grundwasser für die Landwirtschaft als Anpassung an den Klimawandel. *Aqua & Gas* 7+8/2023: 50–56
- [25] Hartmann, D. et al. (2008): Management des Grundwassers in der Schweiz. *Umwelt-Wissen Nr. 0806, Bundesamt für Umwelt BAFU*. 40 S.