



GRUNDWASSERREGIME AN QUELLEN

TYPISIERUNG FÜR DIE SCHWEIZ

Die für Grundwasserstände in Lockergesteins-Grundwasserleitern identifizierten Grundwasserregime (pluvial, pluvio-nival und nivo-glazial) lassen sich auch an Quellen oberflächennaher Locker- und Festgesteine erkennen. Grundwasserregime beschreiben einen charakteristischen Jahresgang, der sich für den Quellabfluss durch den mittleren Verlauf des Pardé-Koeffizienten über die einzelnen Monate ausdrücken lässt. Die Grundwasserregime können an Quellen nach ihrer Variabilität anhand des langjährigen Schwankungsbereichs des Pardé-Koeffizienten weiter differenziert werden.

Marc Schürch; Michael Sinreich; Ronald Kozel, Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Hydrologie*

RÉSUMÉ

RÉGIMES D'EAUX SOUTERRAINES DE SOURCES – TYPOLOGIE EN SUISSE

Sur la base de la définition des régimes pour les débits des cours d'eau ainsi que pour les niveaux des eaux souterraines des aquifères en roches meubles, le terme «régime» est attribué ici également aux sources. Cet article décrit les différents régimes et présente une typologie basée sur le renouvellement des eaux souterraines et sur les débits des sources. Il vise par ailleurs à unifier, du moins pour la Suisse, l'utilisation du terme «régime d'eaux souterraines de sources».

Trois régimes d'eaux souterraines sont distingués – pluvial, pluvio-nival et nivo-glacial – dont les processus de recharge sont spécifiques à chacun, en fonction des régions géographiques. Par conséquent, la variation annuelle des débits de sources en roches meubles et en roches consolidées peu profondes montre une évolution temporelle moyenne comparable sur plusieurs années – pour autant que, pour des raisons hydrogéologiques, le signal d'entrée de recharge ne soit pas tamponné et donc seulement peu marqué à la source. Cette signature caractéristique est exprimée, pour chaque mois, par le coefficient de Pardé moyen. Les régimes d'eaux souterraines de sources peuvent, en outre, être différenciés en fonction de leur variabilité, en tenant compte du mois présentant le plus grand écart des coefficients de Pardé entre les différentes années considérées. Cette variabilité montre à quel

EINLEITUNG

In Festgesteinen, aber auch in Lockergesteinen ausserhalb der Flussebenen, wird die zeitliche Veränderung der Grundwasserquantität wegen fehlender Grundwasserspiegeldaten in der Regel am Quellabfluss beobachtet. An einer Quelle tritt auf natürliche Weise dauerhaft oder zeitweise Grundwasser aus dem Untergrund an die Oberfläche. Quellen werden nach unterschiedlichsten Aspekten klassiert [u. a. 1, 2]: nach dem hydrostatischen Druck (z. B. aufsteigende Quelle, artesische Quelle), nach der Quelltemperatur (z. B. Thermalquelle), nach dem Gehalt an gelösten Stoffen (z. B. Mineralquelle), nach dem Schüttungsverhalten (z. B. perennierend, temporär), nach den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen (z. B. Schichtquelle, Überlaufquelle, Karstquelle) oder aber nach dem saisonalen Verlauf des Quellabflusses.

Analog zum Abflussregime von Fliessgewässern [3], das den langjährigen mittleren Jahresgang des Abflusses beschreibt, wird beim Grundwasser von einem Grundwasserregime gesprochen. Dies wurde für die Grundwasserstände in Lockergesteins-Grundwasserleitern der Schweiz bereits aufgezeigt [4]. In oberflächennahen Locker- und Festgesteinen weisen sowohl die Grundwasserstände wie auch die Quellschüttungen ein ty-

* Kontakt: marc.schuerch@bafu.admin.ch

pisches Muster im Sinne eines regelmässig wiederkehrenden Verlaufs über die Jahreszeiten auf. Daten des Grundwasserstandes aus Bohrungen ausserhalb der Talebenen sind allerdings insbesondere in Festgesteinen selten [5]. Hier eignen sich kontinuierliche Messungen des Quellabflusses zur Beschreibung des Grundwasserregimes.

Die Grundwasserneubildung erfolgt in Quelleinzugsgebieten vorwiegend durch versickerndes Niederschlags- und Schmelzwasser; in Karstgebieten speisen in Schwinden versinkende Bäche ebenfalls den Grundwasserleiter. Phasen, in denen die Grundwasserneubildung überwiegt (Ansteigen der Quellschüttung), wechseln sich ab mit solchen, in denen die Entleerung des Grundwasserspeichers – hin zum Basisabfluss – dominiert (Rückgang der Quellschüttung). Die Dämpfung und eine allfällige zeitliche Verzögerung des Eingangssignals werden durch die hydrogeologischen Verhältnisse (Geometrie, Durchlässigkeit und Überdeckung des Grundwasserleiters) bestimmt. Im vorliegenden Artikel werden die Grundwasserregime für Quellen beschrieben und eine Typisierung in Bezug auf die Neubildungsprozesse und anhand der Quellabflüsse vorgestellt. Damit wird eine zumindest für die Schweiz einheitliche Verwendung des Begriffs der Grundwasserregime an Quellen angestrebt.

QUELLVORKOMMEN

Neben der Nutzung des Grundwassers in Talsohlen ist die Verwendung von Quellwasser mit einem Anteil von 40% an der Trinkwasserversorgung der Schweiz ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor [6]. Quellen sind zudem – wenn naturbelassen – ökologisch wertvolle, artenreiche Habitate [2] und bilden häufig den Ursprung von Fliessgewässern. Das aus kantonalen Katastern abgeschätzte nachhaltig nutzbare Grundwasserdargebot aus Quellen beträgt für die Schweiz etwa 10 km³/Jahr [7].

Die Quellvorkommen der Schweiz können den drei Haupttypen von Grundwasserleitern zugeordnet werden: Lockergesteins-, Kluft- und Karst-Grundwasserleiter.

Lockergesteins-Grundwasserleiter

Während Lockergesteins-Grundwasserleiter in Flusstalsolehen oft eine hohe Ergiebigkeit aufweisen und durch Förderbrunnen erschlossen sind, werden sie ausserhalb Talsolehen häufig an Quellen genutzt. In den Poren der Lockergesteine (Kiese, Sande) fliesst das Grundwasser nur selten schneller als wenige Meter pro Tag. Quellen aus Lockergesteins-Grundwasserleitern reagieren daher gedämpft und zeitlich verzögert auf Niederschlagsereignisse.

Kluft-Grundwasserleiter

Kluft-Grundwasserleiter treten im Mittelland und in grossen Teilen des alpinen Raums auf und reichen von fein geklüfteten Sandsteinen und Mergeln der Molasse bis zu kristallinen Gesteinen in den Alpen (Granite, Gneise etc.). Kluft-Grundwasserleiter reagieren im Allgemeinen eher langsam auf sich verändernde Niederschlagsverhältnisse, können jedoch je nach Art des Gesteins und Grösse des Einzugsgebietes unterschiedlich variable Abflüsse aufweisen.

Karst-Grundwasserleiter

Karst-Grundwasserleiter sind typisch für den Jura, die Voralpen und die Alpensüdseite. Sie zeichnen sich durch eine rasche

Infiltration und eine schnelle unterirdische Fliesskomponente aus. Karstquellen reagieren deshalb oft unmittelbar und mit hohen Abflüssen auf Niederschläge, wobei die Quellschüttungen jedoch auch rasch wieder abnehmen. Daneben besitzen sie einen geringeren, je nach Speicherfähigkeit des Gesteins mitunter auch lang anhaltenden Basisabfluss.

Die Hydrogeologische Karte 1:500 000 beinhaltet die wichtigsten gefassten und ungefassten Quellen der Schweiz und klassiert diese grob hinsichtlich ihrer Schüttungsmenge (<600 l/min und >600 l/min, [8]). Detaillierter erfasst sind Quellen in den Hydrogeologischen Karten 1:100 000 [z.B. 9, 10], im Geologischen Atlas 1:25 000 sowie in den Quellkatastern und Grundwasserkarten der Kantone. Karstquellen sind für Teile des Landes in [11] aufgeführt, Zusammenstellungen der Mineral- und Thermalquellen der Schweiz finden sich in [12] und [13].

Die zeitlichen Veränderungen von Quellabflüssen werden insbesondere von Wasserversorgungen, durch kantonale Messnetze sowie durch die *Nationale Grundwasserbeobachtung* NAQUA erfasst. Im Rahmen des NAQUA-Moduls QUANT, das die Datengrundlage für die hier vorgestellte Auswertung von Quellabflüssen hinsichtlich Grundwasserregime bildet, wird die Grundwasserquantität charakteristischer Grundwasservorkommen der Schweiz anhand von Grundwasserständen und Quellschüttungen kontinuierlich beobachtet.

KENNGRÖSSEN DES QUELLABFLUSSES

Zur Beschreibung des hydrogeologischen Verhaltens von Quellen und des an ihnen beobachteten Grundwasserregimes werden im Folgenden der *Pardé*-Koeffizient des Quellabflusses sowie dessen Schwankungsbereich herangezogen. Diese Kenngrössen stellen ein Mass für den typischen jahreszeitlichen Gang und das Ausmass der langjährigen monatlichen Abflussunterschiede dar. Sie widerspiegeln somit die generelle und längerfristige Reaktion des Grundwasserleiters, der eine Quelle speist. Absolute Schwankungen im Quellabfluss sind dagegen besser durch den Parameter der Schüttungszahl gekennzeichnet.

MITTLERER PARDÉ-KOEFFIZIENT

Der dimensionslose *Pardé*-Koeffizient (PK) wird klassischerweise für die Bestimmung des Abflussregimes von Fliessgewässern verwendet. Er ist definiert als das Verhältnis des mehrjährigen Monatsmittels ($MQ_{(Monat)}^{mehrf\ddot{a}hrig}$) zum mehrjährigen Jahresmittel ($MQ_{(Jahr)}^{mehrf\ddot{a}hrig}$) des Abflusses über die gesamte Messperiode [3]:

$$PK_{(Monat)} = \frac{MQ_{(Monat)}^{mehrf\ddot{a}hrig}}{MQ_{(Jahr)}^{mehrf\ddot{a}hrig}} \quad (\text{Formel 1})$$

Erfahrungsgemäss liegen die nach dieser Formel berechneten PK-Werte für Fliessgewässer im Bereich zwischen 0 und 5 [3]. Für die Beschreibung des Grundwasserregimes anhand von Grundwasserständen musste der *Pardé*-Koeffizient abgeändert werden, um unabhängig von der Wahl des Höhenbezugspunktes auf Messungen des Grundwasserstandes übertragen werden zu können [4]. Das mehrjährige Monatsmittel ($MH_{GW(Monat)}^{mehrf\ddot{a}hrig}$) und das mehrjährige Jahresmittel ($MH_{GW(Jahr)}^{mehrf\ddot{a}hrig}$) des Grund-

wasserstandes werden dazu – bevor sie zueinander in Beziehung gesetzt werden – zunächst auf das jeweils kleinste mehrjährige Monatsmittel ($MH_{GW(\text{Min})}^{\text{mehrjährig}}$) bezogen. Somit wird der Regime-Koeffizient des Grundwasserstandes (GWRK) wie folgt beschrieben:

$$GWRK_{(\text{Monat})} = \frac{MH_{GW(\text{Monat})}^{\text{mehrjährig}} - MH_{GW(\text{Min})}^{\text{mehrjährig}}}{MH_{GW(\text{Jahr})}^{\text{mehrjährig}} - MH_{GW(\text{Min})}^{\text{mehrjährig}}} \quad (\text{Formel 2})$$

Im Gegensatz dazu kann der *Pardé*-Koeffizient des Abflusses für Grundwasseraustritte an Quellen unverändert übernommen werden (*gem. Formel 1*). Für die Bestimmung des Grundwasserregimes an Quellen wird der Jahresgang der mittleren PK-Werte für die Quellabflüsse der Monate Januar bis Dezember herangezogen. Durch die Verwendung der mehrjährigen monatlichen Mittelwerte kommen rasche und kurzzeitige Schwankungen des Quellabflusses, wie z. B. bei Starkniederschlägen, nicht zum Ausdruck. Ebenso werden Monate bzw. Jahre mit besonders geringen oder besonders hohen Schüttungsunterschieden ausgemittelt. Der Jahresgang der mittleren PK-Werte repräsentiert folglich einen charakteristischen mittleren saisonalen Verlauf des Quellabflusses über die Beobachtungsperiode. *Figur 1* zeigt beispielhaft für eine Quelle die langjährigen Monatsmittel des PK-Wertes sowie die Ganglinien der PK-Werte der Einzeljahre.

Da das Vorgehen zur Berechnung des *Pardé*-Koeffizienten des Quellabflusses allein auf dem Schüttungsgang beruht, kann dieser Ansatz gleichermaßen auf Abflüsse von Quellen in Lockergesteinen wie auch in Kluft- und Karst-Festgesteinen angewendet werden. Der Abfluss von Quellen in Lockergesteins-Grundwasserleitern erreicht in der Regel mittlere monatliche

PK-Werte von 0 bis 2, in Kluft-Grundwasserleitern von 0 bis 3 und in Karst-Grundwasserleitern von 0 bis 5. Mittlere PK-Werte von Karstquellen sind somit mit denen des Abflusses von Fließgewässern vergleichbar. Allerdings können Festgesteins-Grundwasserleiter sowohl im Mittelland als auch in den Alpen Deckschichten z. B. aus Hangschutt- oder Moränenablagerungen aufweisen. Quellen liegen in solchen Gebieten oft am Übergang von der Deckschicht zum darunterliegenden Festgestein, wodurch die hier üblicherweise erwarteten Schwankungen des Quellabflusses durch davon abweichende Fließverhältnisse in der Deckschicht überprägt sein können.

SCHWANKUNGSBEREICH DES PARDÉ-KOEFFIZIENTEN

Neben dem mittleren *Pardé*-Koeffizienten können die PK-Werte der Monatsabflüsse auch jahresspezifisch angegeben werden. Sie beziehen sich dann auf das jeweilige Einzeljahr, ausgedrückt durch (vereinfacht nach [14]):

$$PK_{(\text{Monatsmittel des Jahres } j)} = \frac{MQ_{(\text{Monatsmittel des Jahres } j)}}{MQ_{(\text{Jahresmittel des Jahres } j)}} \quad (\text{Formel 3})$$

In *Figur 1* sind dazu neben den mittleren PK-Werten der Monate Januar bis Dezember – als Mittel der Jahre der Beobachtungsperiode – auch die jahresspezifischen monatlichen PK-Werte dargestellt. Aufgrund der Abhängigkeit des Quellabflusses von der aktuellen Grundwasserneubildung und damit den jeweiligen Witterungsverhältnissen ist der Verlauf der PK-Werte der Einzeljahre unterschiedlich. Ist die Reaktion der Quellschüttung auf Neubildungsereignisse stark gedämpft, sind meist auch die Schwankungen der jahresspezifischen PK-Monatswerte gering. Quellen, deren Abfluss dagegen rasch und stark auf diese Einflüsse anspricht, weisen häufig deutlich stärkere Schwankungen auf.

Die Differenz zwischen Maximum und Minimum der jahresspezifischen PK-Werte ergibt dann den Schwankungsbereich des *Pardé*-Koeffizienten (ΔPK) eines jeden Monats über die Einzeljahre:

$$\Delta PK_{(\text{Monat})} = PK_{(\text{Monat})}^{\text{maximal}} - PK_{(\text{Monat})}^{\text{minimal}} \quad (\text{Formel 4})$$

Der Schwankungsbereich des *Pardé*-Koeffizienten wird hier verwendet, um zusätzlich zum Jahresverlauf der mittleren PK-Werte die Variabilität des Grundwasserregimes über die gesamte Messperiode abzubilden. Während der mittlere *Pardé*-Koeffizient nichts über die Unterschiede von einem Jahr zum anderen aussagt, gibt der Schwankungsbereich als Umhüllende der jahresspezifischen PK-Monatswerte einen Eindruck, wie stark die Monatsabflüsse der einzelnen Jahre (z. B. Januar 2000, Januar 2001 etc.) voneinander abweichen, d. h. wie stabil bzw. wie variabel der Jahresverlauf der PK-Werte sein kann.

SCHÜTTUNGSZAHL

Direkte, ungemittelte Abflussschwankungen einer Quelle werden über die Schüttungszahl (SZ) erfasst. Sie erlaubt Aussagen, die weder der mittlere *Pardé*-Koeffizient noch der Schwankungs-

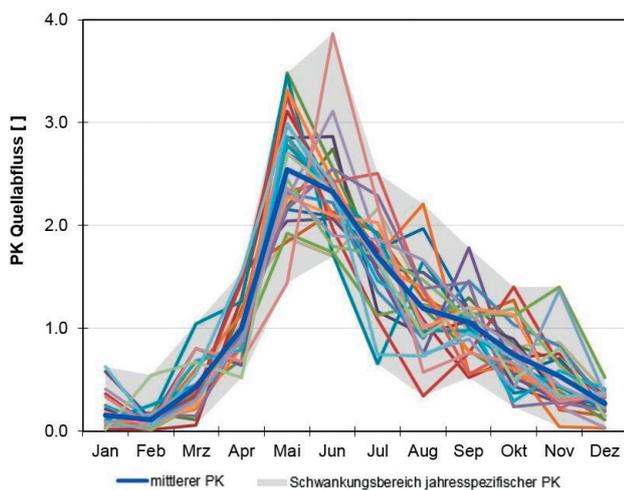


Fig. 1 Verlauf des langjährigen mittleren *Pardé*-Koeffizienten des Quellabflusses von Januar bis Dezember (in blau) sowie der monatlichen PK-Werte der Einzeljahre für 1989 bis 2015. Die Umhüllende aller Ganglinien bildet den Schwankungsbereich des *Pardé*-Koeffizienten (flächig in grau).

Evolution du coefficient de *Pardé* (PK) moyen du débit d'une source de janvier à décembre sur la totalité de la période de mesure (en bleu) et valeurs du PK pour chaque année de 1989 à 2015. L'enveloppe de toutes les courbes (surface grise) constitue l'écart du coefficient de *Pardé*.

bereich der jahresspezifischen PK-Werte liefern können, nämlich über die kurzfristigen Reaktionen im Quellabfluss bzw. den maximalen Schüttungsunterschied über einen bestimmten Zeitraum. Dennoch besteht ein Zusammenhang, da sich alle drei Kenngrößen auf die Veränderungen der Quellschüttung beziehen – wenn auch für unterschiedliche Zeitskalen. Dabei beschreibt die Schüttungszahl das Verhältnis zwischen dem grössten und dem kleinsten gemessenen Abfluss während der Beobachtungsperiode [z.B. 15]:

$$SZ = \frac{Q_{\text{Max}} (\text{Einzelwert})}{Q_{\text{Min}} (\text{Einzelwert})} \quad (\text{Formel 5})$$

Liegt die Schüttungszahl einer Messstelle unter dem Wert 10, kann man von einer mässig variablen Quellschüttung sprechen. Quellen in Lockergesteins- und homogenen Festgesteins-Grundwasserleitern liegen oft in diesem Bereich. Reagiert eine Quelle dagegen rasch und ausgeprägt auf Einzelereignisse, wie etwa Starkniederschläge, und verzeichnet in Niedrigwassersituationen eher geringe Abflüsse, ist die Schüttungszahl deutlich grösser. So können Quellen in Karst-Grundwasserleitern mit einer direkten Infiltration und einer schnellen Fließkomponente Werte von >1000 aufweisen. Generell zeigen die Schüttungszahl, respektive die Schnelligkeit der Reaktion des Quellverhaltens

auf Neubildungsprozesse, auch die Vulnerabilität des Grundwassersystems an [16].

DEFINITION DES GRUNDWASSERREGIMES

GRUNDWASSERNEUBILDUNG, NATURRAUM UND JAHRESGANG

Während für die Fliessgewässer in der Schweiz 16 Abflussregime beschrieben sind [3], wurden für die Grundwasserstände in Lockergesteinen drei Regimetypen unterschieden [4]: pluviales, pluvio-nivales und nivo-glaziales Grundwasserregime. Diese drei Regime beziehen sich in erster Linie darauf, welche Komponenten – Niederschlag, Schneeschmelze bzw. Gletscherschmelze – die Grundwasserneubildung im betrachteten Grundwasserleiter dominieren. Sie lassen sich der naturräumlichen Gliederung der Schweiz in Jura/Mittelland (pluvial), Voralpen bzw. Alpensüdseite (pluvio-nival) und Alpen (nivo-glazial) zuordnen, wobei die beiden letzteren Regime durch Flussinfiltration in unterstromige Grundwasservorkommen übertragen werden können [4]. Die Naturräume eignen sich ebenso als Grundlage zur Beschreibung des Grundwasserregimes an Quellen (Fig. 2). Auch hier gibt das zugeordnete Regime an, welche Art der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet einer Quelle vorherrschend ist. Der saisonale Verlauf der Neubildungsprozesse äussert sich dann in der Regel im Jahresgang des Quellabflusses, bzw. lässt sich durch den Gang des mittleren *Pardé*-Koeffizienten veranschaulichen. Es ergeben sich damit für das pluviale, pluvio-

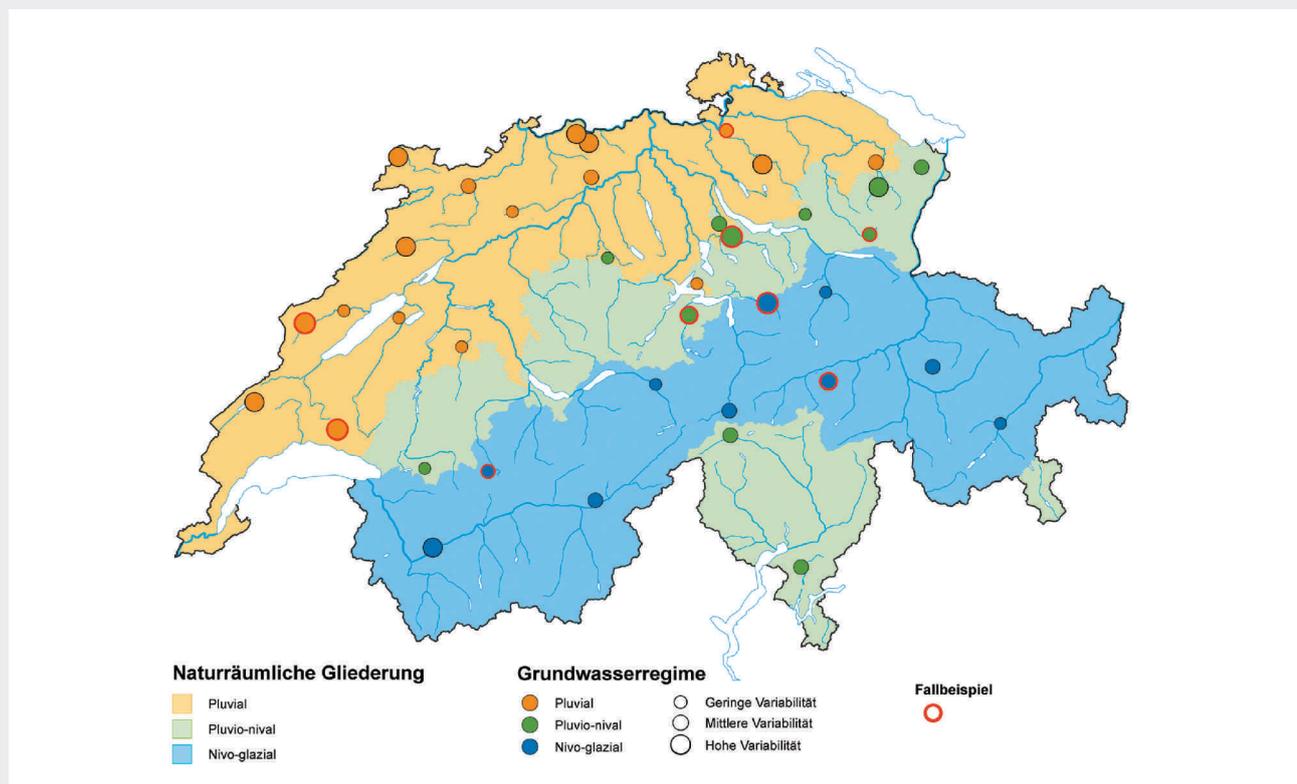


Fig. 2 Grundwasserregime der Schweiz nach naturräumlicher Gliederung sowie für Quellmessstellen in Bezug auf den *Pardé*-Koeffizienten. Es wurden 38 Messstellen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA [17], Modul QUANT (Grundwasserquantität) ausgewertet, welche repräsentativ die Verhältnisse der Grundwasserquantität der Schweiz abbilden und für welche langjährige kontinuierliche Messungen des Quellabflusses vorliegen.

Régimes d'eaux souterraines en Suisse selon la répartition des régions géographiques ainsi que relatifs à des stations de mesure par rapport au coefficient de *Pardé*. Dans le cadre de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA [17], module QUANT (quantité des eaux souterraines), 38 stations de mesure ont été analysées, à la fois représentatives des conditions en Suisse et ayant des mesures en continu pluriannuelles du débit de source.

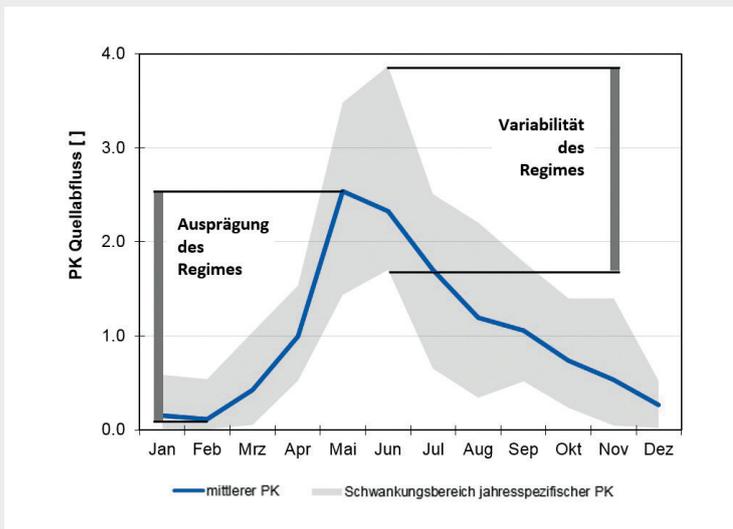


Fig. 3 Typischer Jahresgang einer Quelle mit Ausprägung und Variabilität des Grundwasserregimes anhand der Amplitude des mittleren Pardé-Koeffizienten (hier zwischen Februar und Mai) sowie dem maximalen Schwankungsbereich der PK-Monatswerte der Einzeljahre (ΔPK_{max} , hier im Juni).

Evolution annuelle typique d'une source avec l'intensité et la variabilité du régime d'eaux souterraines, démontrées respectivement par l'amplitude des valeurs du coefficient de Pardé (PK) moyen (entre février et mai) et par l'écart maximal des valeurs mensuelles du PK des différentes années (ΔPK_{max} , en juin).

nivale und nivo-glaziale Grundwasserregime jeweils typische Muster, die im Weiteren anhand von Fallbeispielen detailliert beschrieben werden. Die entsprechende Ausprägung des Regimes an der Quelle – also wie deutlich sich der saisonale Verlauf am Quellabfluss und damit an den mittleren PK-Werten manifestiert – kann dabei sehr unterschiedlich sein.

Ein Grundwasserregime kann als umso ausgeprägter bezeichnet werden, je grösser die Amplitude der Ganglinie des mittleren Pardé-Koeffizienten ist, d.h. je mehr die mittleren PK-Monatswerte über das Jahr voneinander abweichen (Fig. 3). Über eine besondere Ausprägung verfügt ein Regime, wenn ein stets zur selben Jahreszeit stattfindendes Ereignis die Grundwasserneubildung und damit das Abflussverhalten bestimmt, wie zum Beispiel die Gletscherschmelze in alpinen Einzugsgebieten. Konzeptionell ist es dabei für die Bestimmung des Grundwasserregimes und seiner Ausprägung irrelevant, ob es sich um kleine oder abflussstarke Quellaustritte handelt; mathematisch begründet (s. Formel 1) sind jedoch die PK-Unterschiede bei Quellen mit einem hohen Basisabfluss geringer als bei Quellen mit niedrigem Basisabfluss.

Aufgrund der lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten kann der tatsächliche Jahresgang des Quellabflusses so weit verzögert und gedämpft sein, dass die Ausprägung des dort zu erwartenden Grundwasserregimes sehr gering ist. Dies trifft z.B. auf Grundwasserleiter mit einer mächtigen ungesättigten Zone zu. Gedämpfte Regime sind an Quellen häufiger der Fall als bei Grundwasserständen in Lockergesteinen, da eine Quelle den Austrittsort des hydrogeologischen Systems darstellt und somit hier die Effekte über das gesamte Einzugsgebiet integriert sind. Im Extremfall kann anhand des Gangs der mittleren PK-Werte nicht mehr auf das eigentliche Grundwasserregime im Einzugsgebiet der Quelle geschlossen werden. Meist ist aber – auch aufgrund der Kenntnis der entsprechenden Neubildungsprozesse sowie der naturräumlichen Gliederung – trotzdem eine

Zuordnung möglich, sodass man dennoch von einem, wenn auch gedämpften bzw. gering ausgeprägten, Regime sprechen kann.

DIFFERENZIERUNG NACH VARIABILITÄT

Je nach Wiederkehr des Gangs der jahresspezifischen PK-Monatswerte lässt sich an Quellen innerhalb des pluvialen, pluvio-nivalen und nivo-glazialen Grundwasserregimes jeweils ein Regimetyp mit geringer, mittlerer und hoher Variabilität unterscheiden (Tab. 1). Die präsentierte Klassierung der Variabilität richtet sich nach dem maximalen Schwankungsbereich der jahresspezifischen PK-Werte (ΔPK_{max}), also nach dem Monat mit der grössten Schwankung über die Einzeljahre gemäss Formel 4 (Fig. 3). Der Schwankungsbereich ist je nach Quelle unterschiedlich und spiegelt somit in gewisser Weise die spezifischen hydrogeologischen sowie strukturellen Verhältnisse innerhalb des Grundwasserleiters wider. Zusammen ermöglichen der Gang des mittleren Pardé-Koeffizienten (Formel 1) und dessen zwischenjährlicher Schwankungsbereich (Formel 4) eine differenzierte Definition des Grundwasserregimes an Quellen und somit eine zusätzliche Charakterisierung des Quellabflussverhaltens. Ausprägung und Variabilität des Grundwasserregimes an einer Quelle stehen insofern in Zusammenhang, als dass bei einem deutlichen Jahresgang der mittleren PK-Werte in der Regel auch mit einem grösseren Schwankungsbereich zu rechnen ist (Fig. 4). Dies beruht darauf, dass sich die hydrogeologische Charakteristik des Grundwassersystems gleichermaßen inner- und zwischenjährlich auswirkt. Der Effekt zeigt sich am stärksten beim nivo-glazialen Regime mit seiner häufig deutlichen Ausprägung. Falls ein Regime nur mässig ausgeprägt ist, heisst dies allerdings nicht zwangsläufig, dass auch der Schwankungsbereich der jahresspezifischen PK-Werte gering ist. Vielmehr können der mehrjährige mittlere Jahresgang und der Gang der Einzeljahre – v.a. bei auf einzelne Niederschlagsereignisse reagierenden Grundwasserleitern mit hoher kurzfristiger Reaktion des Quellabflusses – sehr voneinander abweichen. Heterogene Kluft- und Karst-Grundwasserleiter weisen in der Regel eine höhere Variabilität des Grundwasserregimes auf als homogene Kluft- und Lockergesteins-Grundwasserleiter (Fig. 5). Auch ist bei vergleichbaren hydrogeologischen Verhältnissen die Variabilität an Quellen mit kleinem Einzugsgebiet eher geringer als an solchen mit grossem Einzugsgebiet. Dies gilt ebenso für die Schüttungszahl, da sie gleichsam Ausdruck variabel reagierender Fliesssysteme ist. Setzt man – wie für

ΔPK_{max}	Grundwasserregime		
	pluvial	pluvio-nival	nivo-glazial
< 1	geringe Variabilität		
1-2	mittlere Variabilität		
> 2	hohe Variabilität		

Tab. 1 Grundwasserregimetypen an Quellen in der Schweiz entsprechend der dominierenden Art der Grundwasserneubildung (pluvial, pluvio-nival, nivo-glazial) und differenziert nach der Variabilität des Regimes (ΔPK_{max} = maximaler Schwankungsbereich der spezifischen PK-Monatswerte aller Einzeljahre).

Types de régimes d'eaux souterraines de sources en Suisse en fonction du processus de recharge principale (pluvial, pluvio-nival, nivo-glacial), différenciés selon la variabilité (ΔPK_{max} = écart maximal des valeurs mensuelles du coefficient de Pardé (PK) de chaque année) du régime.

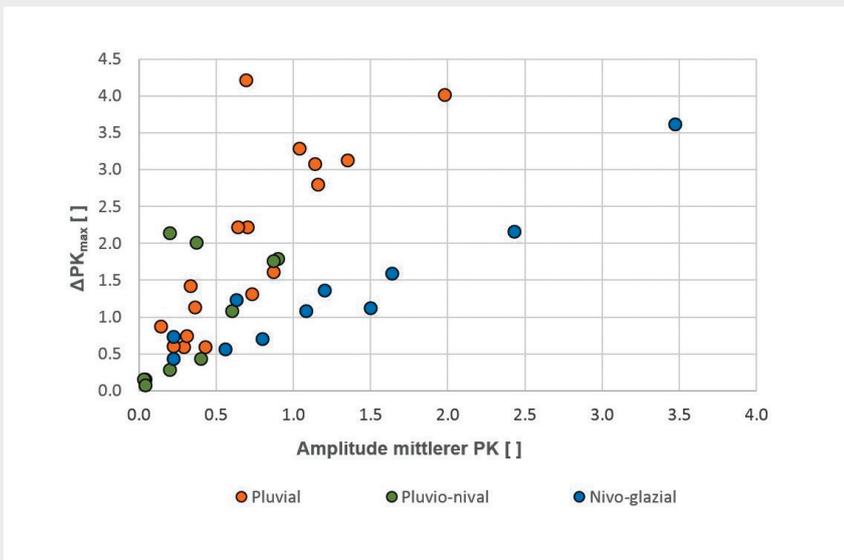


Fig. 4 Zusammenhang zwischen der Ausprägung (Amplitude der mittleren PK-Werte) und der Variabilität (maximaler Schwankungsbereich (ΔPK_{max}) der jahresspezifischen PK-Monatswerte aller Einzeljahre) der Grundwasserregime an den ausgewerteten NAQUA-Quellmessstellen.

Relation entre l'intensité (amplitude des valeurs du coefficient de Pardé (PK) moyen) et la variabilité (écart maximal (ΔPK_{max}) des valeurs mensuelles du PK des différentes années) du régime d'eaux souterraines aux stations de mesure NAQUA considérées.

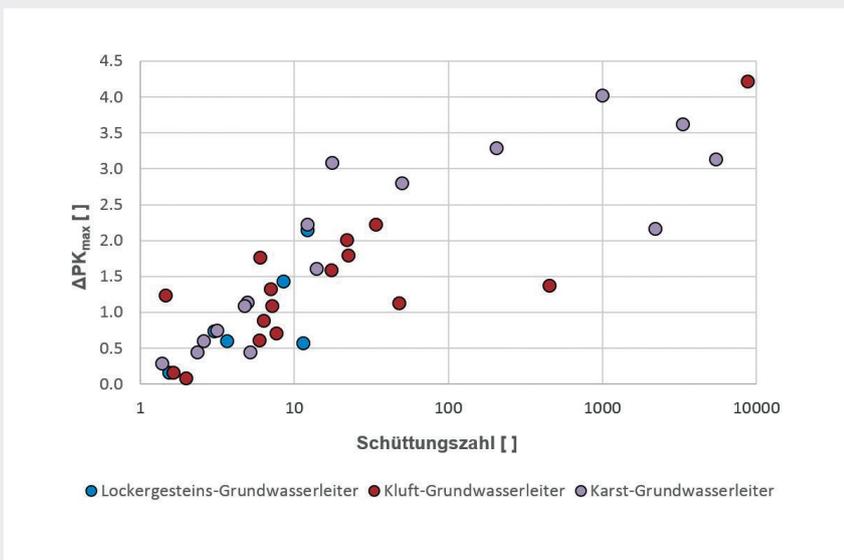


Fig. 5 Korrelation von Variabilität des Grundwasserregimes (maximaler Schwankungsbereich (ΔPK_{max}) der jahresspezifischen PK-Monatswerte) und Schüttungszahl (gemäss Formel 5; zeitweise trockenfallende Quellen erhalten den Wert $Q_{min} = 1$ l/min) der ausgewerteten NAQUA-Quellmessstellen nach Grundwasserleitertyp.

Corrélation entre la variabilité du régime d'eaux souterraines (écart maximal (ΔPK_{max}) des valeurs mensuelles du coefficient de Pardé (PK) des différentes années) et la dynamique de débit (selon la formule 5, avec une valeur $Q_{min} = 1$ l/min attribuée aux sources temporaires) des stations de mesure NAQUA considérées, par type d'aquifère.

die Auswertung der untersuchten Messstellen in *Figur 5* dargestellt – Variabilität und Schüttungszahl zueinander in Beziehung, korrelieren beide Kenngrößen relativ gut. Insofern eignet sich die Schüttungszahl nicht nur für eine schnelle Ersteinstufung des Abflussverhaltens,

sondern auch für eine Überprüfung der Variabilität des Grundwasserregimes an Quellen. Allerdings werden rasche Veränderungen des Abflusses durch den *Pardé*-Koeffizienten gemittelt, während dies für die Schüttungszahl nicht der Fall ist. Weitere Parameter, wie die Trocken-

wetterlinie [z. B. 18] oder andere Indizes zum Quellverhalten [z. B. 19], werden hier nicht herangezogen, können aber ebenfalls zur Validierung der vorgestellten Typisierung dienen.

GRUNDWASSERREGIME – BESCHREIBUNG AN FALLBEISPIELEN

Basierend auf den hinsichtlich ihrer Kenngrößen ausgewerteten Quellmessstellen der *Nationalen Grundwasserbeobachtung* NAQUA, Modul QUANT (Grundwasserquantität), werden im Folgenden die Grundwasserregime an Quellen für ausgewählte Fallbeispiele beschrieben (s. *Fig. 2*). Dabei können sowohl der typische Jahresgang des Quellabflusses für die einzelnen Grundwasserregime in Abhängigkeit der Grundwasserneubildung wie auch die unterschiedliche Ausprägung und Variabilität des Regimes als Folge der Eigenschaften des jeweiligen Grundwasserleiters veranschaulicht werden.

PLUVIALES GRUNDWASSERREGIME AN QUELLEN

Das pluviale Grundwasserregime ist typisch für die Naturräume Jura und Mittelland. Die mittlere Höhe der Quelleinzugsgebiete reicht im Jura von etwa 500 bis 1150 m ü. M., im Mittelland von 500 bis 850 m ü. M. Das pluviale Grundwasserregime zeichnet sich durch eine Grundwasserneubildung aus, die – unter Berücksichtigung der Verdunstung – der saisonalen Niederschlagsverteilung folgt. Die Neubildung durch Regen geschieht vor allem im Winter, wogegen die Schneeschmelze in diesen Lagen eine untergeordnete Rolle spielt. Die Abflusshöchststände treten infolgedessen in der Regel im März/April und die Tiefststände im Juli/August auf. Die jährliche Niederschlagsverteilung variiert lokal aufgrund topografischer und mikroklimatischer Verhältnisse sowie von Jahr zu Jahr infolge unterschiedlicher Grosswetterlagen. Daher können die Abflusshöchst- und Abflusstiefststände je nach Lage des Quelleinzugsgebietes zeitlich durchaus voneinander abweichen.

Aufgrund der diversen Einflussfaktoren ist das pluviale Grundwasserregime unterschiedlich stark ausgeprägt. An Quellen in Lockergesteins-Grundwasserleitern weist es oft eine nur geringe bis mittlere Variabilität über die Jahre auf. In Kluft-Grundwasserleitern ist die Variabilität in der Regel etwas höher, in

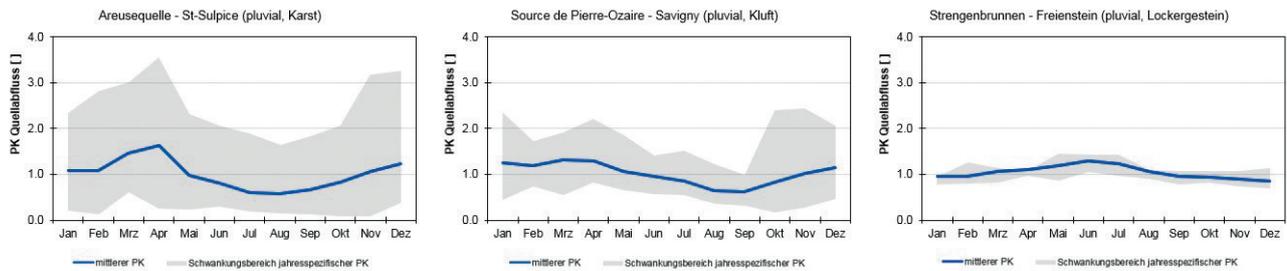


Fig. 6 Quellen mit pluvialem Grundwasserregime unterschiedlicher Ausprägung und Variabilität (beispielhaft dargestellt anhand der Areusequelle in St-Sulpice NE, der Source de Pierre-Ozaire in Savigny VD und der Strengenbrunnen in Freienstein ZH).

Sources au régime d'eaux souterraines pluvial d'intensité et variabilité différentes (à titre d'exemples : Source de l'Areuse à St-Sulpice NE, Source de Pierre-Ozaire à Savigny VD, Strengenbrunnen à Freienstein ZH).

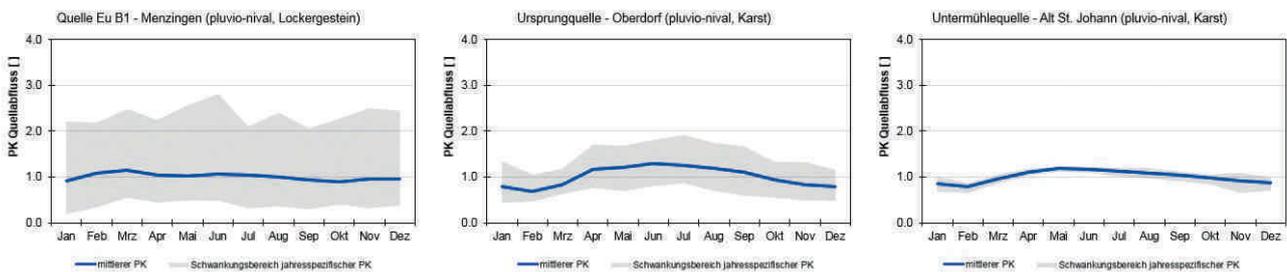


Fig. 7 Quellen mit pluvio-nivalem Grundwasserregime unterschiedlicher Ausprägung und Variabilität (beispielhaft dargestellt anhand der Quelle Eu B1 in Menzingen ZG, der Ursprungquelle in Oberdorf NW und der Untermühlequelle in Alt St. Johann SG).

Sources au régime d'eaux souterraines pluvio-nival d'intensité et variabilité différentes (à titre d'exemples : source EuB1 à Menzingen ZG, Ursprungquelle à Oberdorf NW, Untermühlequelle à Alt St. Johann SG).

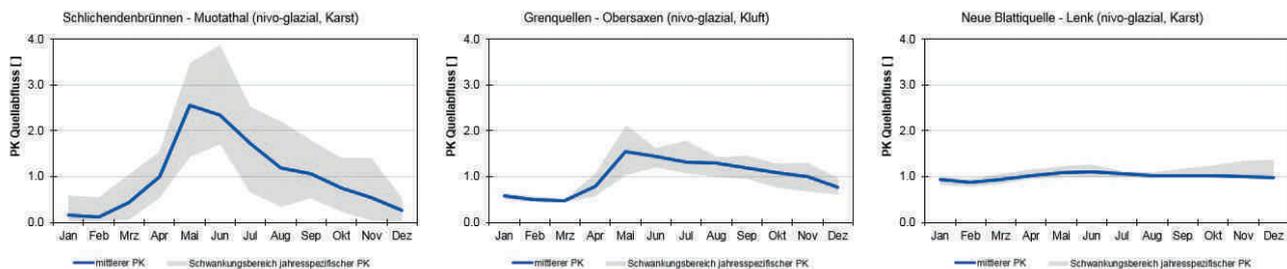


Fig. 8 Quellen mit einem nivo-glazialen Grundwasserregime unterschiedlicher Ausprägung und Variabilität (beispielhaft dargestellt anhand der Schlichendenbrunnen in Muotathal SZ, der Grenquellen in Obersaxen GR und der Neue Blattiquelle in Lenk BE).

Sources au régime d'eaux souterraines nivo-glacial d'intensité et variabilité différentes (à titre d'exemples : Schlichendenbrunnen à Muotathal SZ, Grenquellen à Obersaxen GR, Neue Blattiquelle à Lenk BE).

Karst-Grundwasserleitern mitunter am höchsten. Teilweise ist an den Quellen der mittlere Jahresgang des Abflusses nur sehr gedämpft erkennbar; es handelt sich hierbei um Quellen aus geringer durchlässigen, meist wenig ergiebigen Grundwasserleitern, welche Neubildungsprozesse nur schwach und verzögert wiedergeben.

Die Areusequelle (Messstelle St-Sulpice NE), eine Karstquelle mit einem der grössten Einzugsgebiete in der Schweiz, reagiert rasch und stark auf Niederschlagsereignisse, was sich in einer hohen Variabilität mit einem ΔPK_{\max} -Wert von 3,3 und einer Schüttungszahl von ca. 200 widerspiegelt (Fig. 6). Das pluviale Regime ist hier sehr deutlich ausgeprägt. Im Vergleich dazu reagiert die

Source de Pierre-Ozaire (Messstelle Savigny VD), eine Kluftquelle aus der Molasse, weniger stark auf Witterungsveränderungen. Auch wenn mit einer hohen Variabilität und einem entsprechenden ΔPK_{\max} -Wert von 2,2 (Schüttungszahl ca. 30) weniger ausgeprägt als an der Areusequelle, bestimmt das pluviale Regime auch hier den mittleren Jahresverlauf des Quellabflusses. Die Lockergesteinsquelle Strengenbrunnen (Messstelle Freienstein ZH) spricht dagegen kaum auf einzelne Niederschlagsereignisse an und weist nur eine geringe Variabilität (ΔPK_{\max} -Wert von 0,6) und eine kleine Schüttungszahl von ca. 4 auf. Infolgedessen ist hier das pluviale Regime stark gedämpft und zeitlich verzögert und anhand der PK-Werte allein nicht mehr als solches erkennbar.

PLUVIO-NIVALES GRUNDWASSERREGIME AN QUELLEN

Das pluvio-nivale Grundwasserregime entsteht durch das Zusammenspiel von Niederschlag, Schneebedeckung und Schneeschmelze und ist typisch für die Voralpen und die Alpensüdseite. Die mittlere Höhe der Einzugsgebiete der Quellen reicht von 600 bis 1200 m ü. M. in den Voralpen und von 450 bis 1600 m ü. M. auf der Alpensüdseite. Quellen erfahren hier ihren Abflusshöchststand generell im Mai/Juni im Zuge der Schneeschmelze und überlagernder Frühjahrsniederschläge; der Abflusstiefstand erfolgt im Winter bei stark reduzierter Grundwasserneubildung. Auf der Alpensüdseite kann zudem ein zweites, weniger ausgeprägtes Maximum im Herbst bzw. Winter auftreten. Das pluvio-nivale Regime weist häufig eine geringe bis mittlere Variabilität auf.

Die Lockergesteinsquelle *Eu B1 (Messstelle Menzingen ZG)* entspringt am Übergang der Lorzschotter zur Moränenbedeckung und reagiert relativ rasch auf Niederschlagsereignisse (Schüttungszahl 46). Das pluvio-nivale Regime weist hier eine hohe Variabilität auf (ΔPK_{\max} -Wert von 2,3), jedoch – infolge des relativ konstanten Basisabflusses – eine im mehrjährigen Jahresverlauf nur geringe Ausprägung (Fig. 7). Der Karstwasserabfluss der *Ursprungquelle (Messstelle Oberdorf NW)* folgt vor allem Starkniederschlägen und der Schneeschmelze. Das Grundwasserregime ist hier gut ausgeprägt und besitzt eine mittlere Variabilität (ΔPK_{\max} -Wert von 1,1, Schüttungszahl ca. 5). Die *Untermühlequelle (Messstelle Alt St. Johann SG)*, ebenfalls eine Karstquelle, zeigt bei ähnlicher Schüttungszahl nur noch eine geringe Variabilität (ΔPK_{\max} -Wert von 0,4). Dies liegt an einem für Karst-Grundwasserleiter typischen Phänomen, nämlich dass die Hauptquelle und damit der Messort nur niedrige und mittlere Abflüsse erfasst, während sich die starken Abflussschwankungen an z. T. temporären Überlaufquellen bemerkbar machen, welche dann aber bei der kontinuierlichen Abflussmessung häufig nicht berücksichtigt sind. Für den betrachteten Quellaustritt selbst bleibt jedoch die geringe Variabilität (resp. Schüttungszahl) charakteristisch. Trotzdem ist auch hier das pluvio-nivale Regime noch ersichtlich.

NIVO-GLAZIALES GRUNDWASSERREGIME AN QUELLEN

Das nivo-glaziale Grundwasserregime ist das typische Regime der Alpen mit Quelleinzugsgebieten zwischen 800 und 1900 m ü. M. Solche Quellen erreichen ihren Abflusstiefstand in der Regel zwischen Dezember und Februar, da die Winterniederschläge hier grösstenteils in Form von Schnee fallen und somit nicht unmittelbar zur Grundwasserneubildung beitragen. Der Abflusshöchststand erfolgt zwischen Mai und Juli infolge der Schnee- und Gletscherschmelze in den mittleren und höheren Lagen. In den tieferen Lagen kann innerhalb des Alpenraums allerdings auch ein pluvio-nivales Regime ausgebildet sein. Da viele Quelleinzugsgebiete keine bzw. nur geringe Vergletscherung aufweisen, wird das nivo-glaziale Regime in der Regel durch die Schneeschmelze dominiert. In hohen Lagen befinden sich die Quellen vorwiegend im Einflussbereich des Permafrostes.

Bei vorherrschend durch die Schnee- und/oder Gletscherschmelze gespeisten Quellen liegt häufig eine starke Ausprägung des Regimes vor, da die Grundwasserneubildung hier dominant und jährlich wiederkehrend während einer relativ kurzen Zeitspanne von wenigen Monaten stattfindet. Entsprechend geht das nivo-glaziale Regime – bei stabilem Basisabfluss – mehrheitlich

mit einer geringen bis mittleren Variabilität einher. Sehr dynamische Systeme erreichen dagegen auch eine hohe Variabilität des Regimes und v. a. bei starkem Rückgang des winterlichen Basisabflusses eine sehr grosse Schüttungszahl der Quelle.

So ist z. B. die Karstquelle *Schlichendenbrünnen (Messstelle Muotathal SZ)* durch ein sehr ausgeprägtes Abflussregime sowie eine hohe Variabilität (ΔPK_{\max} -Wert von 2,2) charakterisiert (Fig. 8). Die Schneeschmelze und damit das nivo-glaziale Regime dominieren hier den jahreszeitlichen Quellabfluss deutlich. Zudem reagiert die Quelle extrem auf Starkniederschlagsereignisse, was sich in der Schüttungszahl von 2200 zeigt, ebenso wie in Karstspiegelschwankungen von mehreren hundert Metern [20]. Die *Grenquellen (Messstelle Obersaxen GR)* weisen dagegen eine mittlere Variabilität (ΔPK_{\max} -Wert von 1,1) und eine Schüttungszahl von ca. 7 auf, was typisch für die dortigen kristallinen Kluftegesteine ist. Das nivo-glaziale Regime ist hier weniger deutlich ausgeprägt. Die *Neue Blattiquelle (Messstelle Lenk BE)* wird von weniger durchlässigen Bereichen eines Karst-Grundwasserleiters gespeist. Sie reagiert daher gedämpft auf die Schneeschmelze und ist somit durch ein Regime geringer Variabilität (ΔPK_{\max} -Wert von 0,4) und auch eine kleine Schüttungszahl von nur etwa 2 gekennzeichnet. Die Ausprägung des nivo-glazialen Regimes ist hier nur noch sehr schwach.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Basierend auf der Regimedefinition für Abflüsse an Fliessgewässern und von Grundwasserständen in Lockergesteins-Grundwasserleitern wurde hier der Regimebegriff auf Quellen ausgeweitet. Der Jahresgang des mittleren *Pardé*-Koeffizienten der Monate Januar bis Dezember über die gesamte Messperiode erlaubt eine Beschreibung der Grundwasserregime anhand des Quellabflusses. Drei Regime – pluvial, pluvio-nival und nivo-glazial – können hinsichtlich vergleichbarer Grundwasserneubildungsprozesse unterschieden werden, die je nach Naturraum einen typischen zeitlichen Verlauf aufweisen. Die Ausprägung des Regimes – bestimmt durch die Amplitude der mittleren PK-Werte über das Jahr – hängt neben der Grundwasserneubildung vor allem von den Eigenschaften des Grundwasserleiters ab und beschreibt, wie deutlich sich dieses Muster im Quellabfluss manifestiert.

Diese Typisierung kann anhand des maximalen Schwankungsbereichs der jahresspezifischen PK-Monatswerte nach der Variabilität des Regimes – gering, mittel, hoch – weiter differenziert werden. Zwar basiert auch der Schwankungsbereich der jahresspezifischen PK-Werte auf Monatsmittelwerten, jedoch der Einzeljahre, und widerspiegelt somit die Stabilität des Abflussverhaltens einer Quelle innerhalb eines bestimmten Regimes von einem Jahr zum anderen. Der Schwankungsbereich der jahresspezifischen PK-Werte ist dabei weniger akzentuiert als etwa die Schüttungszahl, auch wenn beide Parameter ähnliche Aussagen ermöglichen.

Quellen zeigen – sofern sich das Muster nicht aufgrund der hydrogeologischen Verhältnisse zeitlich verzögert bzw. nur mit geringer Ausprägung auftritt – innerhalb eines Naturraums einen ähnlichen mehrjährigen mittleren Jahresgang des Abflusses. Durch den ausmittelnden Effekt bei der Berechnung der mittleren PK-Werte – mehrjährige, mittlere Monatsmittel der gesamten Messperiode – ergibt sich ein deutlich robusterer Jahresgang als etwa bei der Beobachtung der Abflusskurve einzelner Jahre.

Insgesamt ist das Grundwasserregime an Quellen in vielen Fällen weniger ausgeprägt als das der Grundwasserstände, da die Bestimmung am Quellaustritt integrierend über das gesamte Quelleinzugsgebiet wirkt. Aus diesem Grund wurde hier die Variabilität als zusätzliche Kenngrösse eingeführt.

Die Zuordnung zu einem Grundwasserregime erlaubt, die Prozesse der Grundwasserneubildung darzustellen und auf die Funktionsweise eines Grundwasserleiters rückzuschliessen. Das Grundwasserregime stellt somit einen zusätzlichen Parameter zur hydrogeologischen Charakterisierung eines Quellaustritts bzw. eines Grundwasserleiters dar. So lässt sich etwa anhand der Regimetypen veranschaulichen und grossmassstäblich generalisieren, wie sich das regionale Abflussverhalten infolge von Klimaänderung saisonal verschieben wird [21]. Grundwasserregime liefern zudem nützliche Informationen für die Bewirtschaftung und den Schutz entsprechender Grundwasservorkommen. Sie zeigen an, wie stark die mittleren Schwankungen des Quellabflusses sind, bzw. wann innerhalb eines Jahres generell mit hohen, mittleren oder tiefen Quellabflüssen zu rechnen ist, also etwa in welchen Jahreszeiten man um alternative Wasserressourcen während allfälliger Trockenperioden besorgt sein muss. Die Grundwasserregimetypen werden in der Schweiz auch für die Zustandsbeschreibung der Grundwasserquantität im Rahmen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA herangezogen [17, 22].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Müller, T. (1999): *Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie*. Springer-Verlag, 367 S.
- [2] Zollhöfer, J.M. (1997): *Quellen – die unbekanntesten Biotope im Schweizer Jura und Mittelland: erfassen, bewerten, schützen*. Zürich: Bristol-Stiftung, 1–153
- [3] Weingartner, R.; Aschwanden, H. (1992): *Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses*. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2. Bundesamt für Umwelt, Bern
- [4] Schürch, M.; Kozel, R.; Biaggi, D.; Weingartner, R. (2010): *Typisierung von Grundwasserregimen in der Schweiz – Konzept und Fallbeispiele*. Gas

Wasser Abwasser, gwa 11/2010, 955–965

- [5] Schürch, M.; Kozel, R.; Pasquier, F. (2006): *Observation of groundwater resources in Switzerland – Example of the karst aquifer of the Areuse spring*. 8th Conference on limestone hydrogeology, Neuchâtel, 21–23 Septembre 2006, 241–244
- [6] SVGW (2016): *Jahrbuch 2016*. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich
- [7] Sinreich, M. et al. (2012): *Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten*. Aqua & Gas, 9, 16–28
- [8] Bitterli, T. et al. (2004): *Grundwasservorkommen*. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 8.6. Bundesamt für Umwelt, Bern
- [9] Pasquier, F.; Bichet, V.; Zwahlen, F. (2006): *Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100 000*. Blatt Vallorbe – Léman nord. Geotechnische Kommission, Zürich
- [10] Hauber, L.; George, M.; Pfirter, U.; Zechner, E. (2014): *Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100 000*. Blatt Basel – Bâle. Geotechnische Kommission, Zürich, Bundesamt für Umwelt, Bern
- [11] map.geo.admin.ch (2016): *Karstgrundwasser – Karstquellen und Schwinden*. Geoinformationsplattform der Schweizerischen Eidgenossenschaft
- [12] Högl, O. (1980): *Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz*. Paul Haupt, Bern, Stuttgart, 302 S.
- [13] CREGE (2007): *BDFGeotherm – Base de données des fluides géothermiques de la Suisse*. Centre de Recherche en Géothermie CREGE, Neuchâtel, 47 p.
- [14] Pfandler, M.; Weingartner, R.; Diezig R. (2006): *Versteckt hinter den Mittelwerten – die Variabilität des Abflussregimes*. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, HW 50, 116–123
- [15] BMLFUW (2009): *Richtlinie für die Errichtung und Beobachtung von Quellmessstellen in Österreich*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 72 S.
- [16] Pochon, A. et al (2008): *Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland*. Hydrogeology Journal, 16(7), 1267–1281
- [17] BAFU (2009): *Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004 bis 2006*. Umwelt-Zustand Nr. 0903, Bundesamt für Umwelt, Bern, 144 S.
- [18] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R. (1996): *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer-Verlag Berlin, 591 S.
- [19] Galleani, L.; Vigna, B.; Banzato, C.; Russo S.L.

(2011): *Validation of a Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas: The VESPA index*. Journal of Hydrology, 396, 233–245

- [20] Husen, S.; Deichmann N. (2007): *Locally triggered seismicity in the central Swiss Alps following the large rainfall event of August 2005*. Geophys. J. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03561
- [21] SSKA (2013): *Swisskarst Project – toward a sustainable management of karst waters in Switzerland, NRP61 2012 Intermediate report*. Swiss Institute for Speleology and Karst studies, la Chaux-de-Fonds, unpublished report, 47 p., <http://swisskarst.ch/index.php/en/news/media-and-issues>
- [22] BAFU (2016): *Grundwasserbulletin*. Bundesamt für Umwelt, Bern. www.hydrodaten.admin.ch/de/grundwasserbulletin.html

> SUITE DU RÉSUMÉ

point les débits mensuels peuvent fluctuer d'une année à l'autre et fait ainsi référence à la stabilité du comportement saisonnier des sources. Cette typologie est illustrée au moyen d'exemples sélectionnés parmi les stations de mesure du module QUANT (quantité des eaux souterraines) de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA. Il est possible de mettre en lumière l'évolution annuelle typique du débit d'une source pour chacun des régimes non seulement en relation avec la recharge des eaux souterraines, mais également par rapport à l'intensité et à la variabilité du régime résultant des propriétés de l'aquifère en question. La typologie des régimes d'eaux souterraines permet à la fois de présenter les processus de recharge et de déduire le fonctionnement d'un aquifère. Elle constitue ainsi une classification supplémentaire pour la caractérisation hydrogéologique d'une source et par conséquent de l'aquifère alimentant cet exutoire d'eau souterraine.