

Zur Funktionsweise und Entstehung einer Kluftgesteinsquelle

von

MICHAEL SINREICH

Zusammenfassung

Dieser Artikel erläutert die hydrogeologische Situation in einem lokalen Einzugsgebiet am Büchelberg in Aschaffenburg, Bayern. Hier steht geklüftetes Festgestein des kristallinen Vorspessart an, welches als heterogener Grundwasserleiter fungiert. Im Untersuchungsgebiet herrschen dementsprechend sehr variable Grundwasserverhältnisse, was sich insbesondere am Verhalten einer Quelle am Fuße des Büchelberg äußert.

Die untersuchte Kluftgesteinsquelle stellt den Hauptentwässerungspunkt des Gebietes dar. Beobachtungen der Quellschüttung belegen die Anbindung an den Kluftgrundwasserleiter und dessen begrenztes Speichervermögen. So zeichnet sich die Quelle durch hohe jahreszeitliche Schüttungsschwankungen aus und fällt zeitweise trocken. Detailliertere Untersuchungen stützen sich hauptsächlich auf den Gang der elektrischen Leitfähigkeit des Quellwassers während konkreter Niederschlagsereignisse. Dabei läßt die Reaktion der Quelle Rückschlüsse auf Fließ- und Speicherkomponenten im Untergrund zu. Einerseits kommt es zu einem schnellen Ansprechen auf Niederschläge bedingt durch einen Direktabfluß mit unterirdischen Fließgeschwindigkeiten von bis zu 2 m/h. Andererseits wird die Quelle die meiste Zeit von einem wesentlich langsameren Basisabfluß gespeist. Eine besondere Eigenschaft der Quelle ist, daß zumindest zeitweise artesisch gespannte Grundwasserverhältnisse herrschen. Zudem wird bei extremem Hochwasserstand ein periodischer Überlauf im oberen Bereich des Kluftgrundwasserleiters aktiviert.

Die Besonderheiten in der Funktionsweise der Quelle liefern unter Einbeziehen der örtlichen Geländemorphologie eine Theorie zur Quellentstehung. Demnach war zunächst der heutige Überlauf für die Entwässerung des Kluftgrundwasserleiters verantwortlich. Der dort entspringende Bach führte zu Erosion im topographisch tieferen Bereich des Untersuchungsgebietes und dort letztendlich zur Freilegung eines neuen Quellaustrittes. Die heutige hydrogeologische Situation am Büchelberg ist somit Ausdruck der charakteristischen Eigenschaften des Kluftgrundwasserleiters in Verbindung mit hydrologisch-morphologischen Umgestaltungsprozessen.

Stichworte: Hydrogeologie, Quelle, Kluftgrundwasserleiter, Hydrogramm, Schüttung, elektrische Leitfähigkeit, Grundwasserspeicher, Direktabfluß, Basisabfluß, artesisch gespannte Verhältnisse, Quellentstehung, kristalliner Vorspessart, Aschaffenburg, Bayern

Inhaltsübersicht

- 1.0. Einleitung
- 2.0. Grundlagen und Rahmenbedingungen
 - 2.1. Geographisch-geologischer Überblick
 - 2.2. Hydrogeologischer Rahmen
- 2.3. Quellsituation
- 3.0. Hydrogeologische Untersuchungen
 - 3.1. Methoden
 - 3.2. Messungen des Jahresgangs
 - 3.3. Niederschlagsbezogene Messungen
- 4.0. Schlußfolgerungen
 - 4.1. Funktionsweise der Quelle
 - 4.1.1. Fließ- und Speicherverhalten
 - 4.1.2. Quelltyp und -mechanismus
 - 4.2. Entstehung der Quelle
- 5.0. Zitierte Literatur

1.0. Einleitung

Das System Grundwasser basiert auf den geologischen und hydrologischen Gegebenheiten eines Gebietes und beschreibt das Zusammenwirken zwischen dem Untergrundgestein und dem versickerten Niederschlagswasser. Quellen sind die Austrittspunkte dieses hydrogeologischen Systems. Ihre Eigenschaften und ihre Verhaltensweise sind das Resultat sämtlicher auf das Grundwasser einwirkenden Prozesse innerhalb eines Einzugsgebietes, weshalb sich Quellen gut für die Untersuchung der entsprechenden Grundwasserverhältnisse eignen.

Die hydrogeologischen Verhältnisse am Büchelberg in Aschaffenburg (Bayern) sind im Zeitraum 1999/2000 untersucht und in der vorliegenden Schriftenreihe vorgestellt worden (SINREICH 2002). Darauf aufbauend wurde das Gebiet auch in der Folgezeit vor allem im Hinblick auf das Verhalten einzelner Quellen weiter beobachtet. Während die früheren Untersuchungen die allgemeine hydrogeologische Situation am Büchelberg und den Jahresrhythmus der unterschiedlichen Quellen behandelten, steht nun eine spezielle Quelle mit ihren lang- und kurzfristigen Variationen im Vordergrund. Die Beobachtung einzelner Niederschlagsereignisse bildet dabei eine zusätzliche Informationsquelle, um die Besonderheiten dieser Quelle herauszustellen und sie in Zusammenhang mit der hydrogeologischen Gesamtsituation im betrachteten Einzugsgebiet zu stellen. Letztendlich läßt die Gesamtheit dieser Daten eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der Quelle und eine Hypothese ihrer Entstehung innerhalb des anstehenden Kluftgesteins zu.

2.0. Grundlagen und Rahmenbedingungen

2.1. Geographisch-geologischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet befindet sich am bayerischen Untermain am östlichen Stadtrand von Aschaffenburg. Es liegt innerhalb der westlichsten Ausläufer des Spessart und gehört der geologisch-tektonischen Einheit des kristallinen Vorspessart an, welcher hier vor allem aus Einheiten von metamorphen und geklüfteten Glimmerschiefern und Gneisen besteht. Der Büchelberg ist größtenteils bewaldet und besteht nur in seinen talwärtigen Bereichen aus Wiesenflächen. Er erstreckt sich über eine Fläche von ca. 1 km² in einer Höhenlage zwischen etwa 170 m und 270 m ü. NN. Nach Westen fällt das Gelände in Richtung der Mainebene ab, im Osten schließen sich weitere Erhebungen des Vorspessart an. Eine topographische Übersicht des Untersuchungsgebietes liefert Abb. 1.

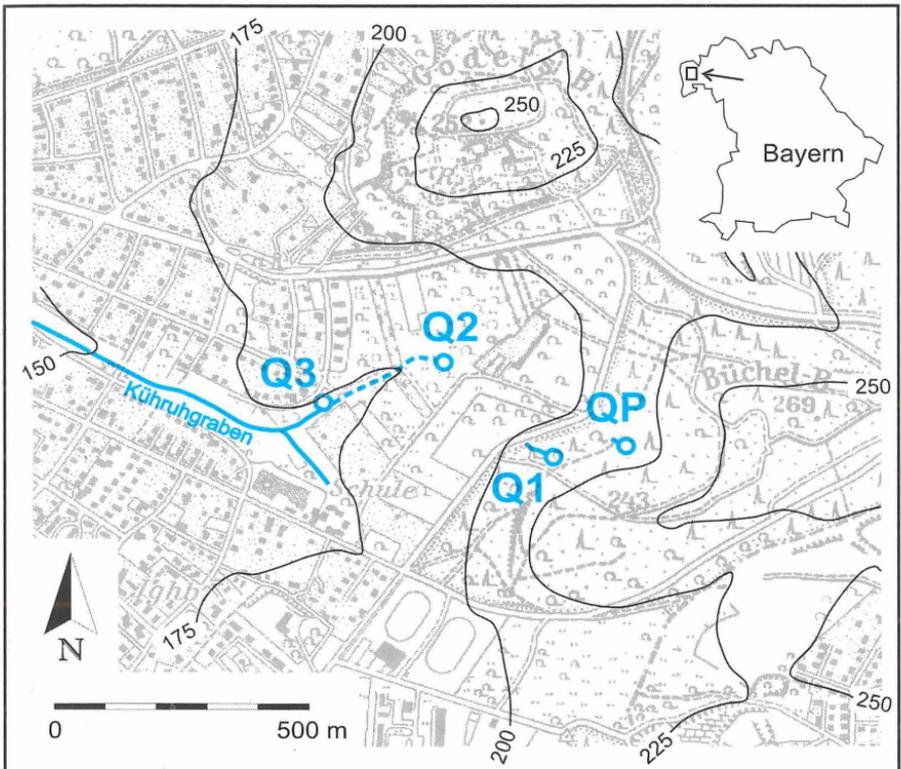


Abb. 1: Geographischer Überblick mit Quellsituation des Untersuchungsgebietes am Büchelberg.

Neben der tektonischen Klüftung sind die Kristallingesteine auch durch Verwitterung beansprucht und verändert worden. Letztere vollzieht sich hauptsächlich oberflächennah, kann aber entlang geschwächter Gesteinsbereiche wie etwa an größeren Klüften oder Zerrüttungszonen bis in eine Tiefe von mehreren Metern bis 10er Metern reichen. Das bei der Verwitterung der Festgesteine übrigbleibende Lockermaterial bildet in weiten Teilen des kristallinen Vorspessart eine sandige Verwitterungsschicht. Dagegen führen die verwitterten Tonminerale oft zu verlehmteten Ablagerungen in den Hangfußbereichen. So werden auch im westlichen Bereich des Büchelberg die kristallinen Festgesteine von bis zu mehreren Metern mächtigen quartären Ablagerungen überdeckt, welche aus Hang- und Terrassensanden mit Kieseinschaltungen und Tonlinsen bestehen (WEINELT 1962).

2.2. Hydrogeologischer Rahmen

In den Untergrund infiltriertes Niederschlagswasser durchsickert die ungesättigte Bodenzone bis zum wassergesättigten Bereich und trägt damit zur Neubildung des örtlichen Grundwassers bei. Innerhalb der gesättigten Zone führen Fließwege zu topographisch niedriger gelegenen Bereichen. Quellen sind die Austrittsorte der gesättigten Zone, befinden sich also dort, wo der Grundwasserspiegel die Geländeoberfläche schneidet.

Im Kluffgestein werden die Wasserwegsamkeiten hauptsächlich durch Trennflächen gebildet, welche ungleichmäßig über das Gestein verteilt sind (Abb. 2). In solchen heterogenen Systemen dienen vor allem größere, zusammenhängende Klüfte oder Störungszonen als entwässernde Strukturen. Insgesamt können Kluffgrundwasserleiter je nach dem Grad der Heterogenität unterschiedliche Eigenschaften aufweisen (POCHON & ZWAHLEN 2003), jedoch sind oft schnelle Fließbewegungen, eine geringe Speicherfähigkeit, und demnach starke Schüttungsschwankungen an Kluffgesteinsquellen charakteristisch.

Die oberflächennahe Verwitterungsschicht aus porösem, sandigem Material bildet oft einen eigenständigen Grundwasserleiter oberhalb des unzersetzten Kluffgesteins (Abb. 2). Auch im Untersuchungsgebiet wurde im obersten Bereich der Festgesteine eine poröse Verwitterungsdecke vorgefunden. Im kristallinen Vorspessart werden zahlreiche gering ergeblige Quellen von einer sol-

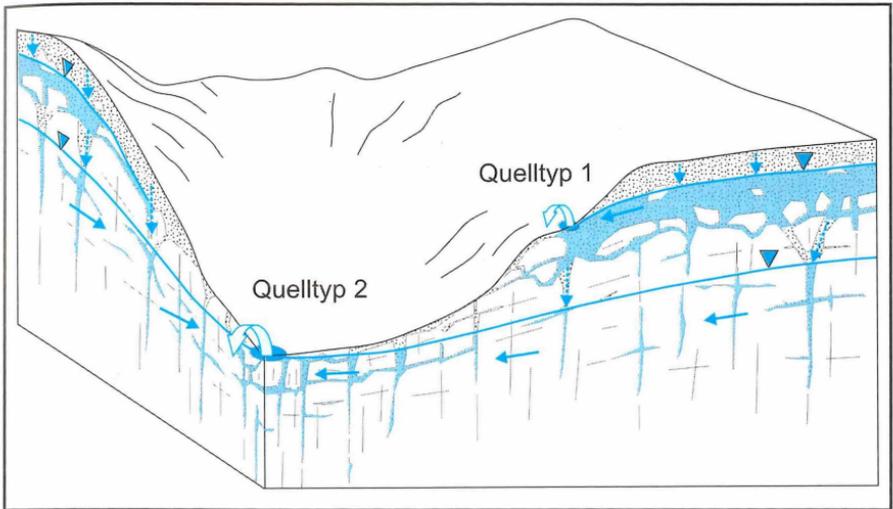


Abb. 2: Modellvorstellung eines oberflächlich aufgelockerten Kluftgrundwasserleiters mit entsprechenden Quellaustritten. Der geklüftete Bereich und die poröse Verwitterungsschicht können durch unterschiedliche Quelltypen entwässert werden.

chen Auflockerungszone gespeist, die an durch Täler eingeschnittenen Bergkuppen kleine Einzugsgebiete entwässern (LfW 2001, Regierung von Unterfranken 2002). Das Festgestein selbst ist nach ANDRES & MATTHESS (1962) allerdings wegen des geringen Speichervolumens trotz verhältnismäßig hoher Niederschläge und einer hohen Quelldichte arm an Kluftwasser und der kristalline Vorspessart deshalb ein ausgesprochenes Wassermangelgebiet.

2.3. Quellsituation

Im Untersuchungsgebiet treten mehreren Quellen aus, welche den Büchelberg nach Westen hin entwässern (Abb. 1). Es hat sich gezeigt, daß diese Quellen zumindest teilweise auch unterschiedliche Grundwasserleitertypen repräsentieren (SINREICH 2002). Zumindest besitzt jede dieser Quellen ihre eigene hydrogeologische Charakteristik:

Die *Quelle Q1* befindet sich im bewaldeten oberen Bereich des Büchelberg. Sie führt das ganze Jahr über Wasser, ist also perennierend. Sie zeichnet sich durch einen oberflächennahen Grundwasserfluß aus, was sich in einer geringen aber konstanten Quellschüttung äußert, welche im Bereich von 0,1 Liter pro Sekun-

de (l/s) liegt. Q1 besitzt ein sehr lokal begrenztes Einzugsgebiet von etwa 0,03 km² und repräsentiert Quellen, welche aus der porösen Verwitterungsschicht oberhalb des Kluftgesteins gespeist werden (Quellentyp 1 in Abb. 2).

An einen tieferen Punkt des Untersuchungsgebietes liegt die *Quelle Q2*. Sie weist mehrere Besonderheiten auf und stellt den Hauptaspekt dieses Artikels dar. Diese Quelle kann deutlich höhere Schüttungen erreichen (mehrere l/s), fällt jedoch zeitweise trocken und ist somit *intermittierend*. Sie liegt etwa 30 Höhenmeter unterhalb von Q1 am Ende einer von ESE kommenden morphologischen Rinne, wobei der Wasseraustritt aus einem Quelltopf von etwa 1,5 m Durchmesser besteht (Abb. 3). Der Boden des Quelltopfes ist mit sandigem Material bedeckt, unter dem in ca. 60 cm Tiefe Festgestein ansteht. Das Wasser dieser Quelle stammt aus weniger oberflächennahen Bereichen mit begrenzter Speicherfähigkeit, also dem eigentlichen Kluftgrundwasserleiter (Quellentyp 2 in Abb. 2).



Abb. 3: Austrittsstelle der Quelle Q2 aus Blickrichtung W. Der Quelltopf liegt an einer morphologischen Rinne, an deren oberen Ende sich der Austritt QP befindet.

Im Bachbett des von Q2 abrinneenden Wassers liegt etwa 150 m unterstromig die *Quelle Q3*, welche den tiefstgelegenen Grundwasseraustritt im Untersuchungsgebiet darstellt. Q3 ist *perennierend* mit einer Schüttung von etwa 1 l/s

im Jahresmittel, wobei sich das Niveau des Quellaustritts je nach Wasserstand entlang der flachen Hangneigung verlagert. Generell liegt dabei der Austrittspunkt umso höher, je größer die Schüttung ist. Q3 entwässert unter anderem Teile der Wiesenflächen am Büchelberg und führt dieses Wasser dem oberflächlichen Abfluß des Kühruhgraben zu, welcher den lokalen Vorfluter bildet (Abb. 1).

Am oberen Ende der morphologischen Rinne, an der weiter talwärts Q2 liegt, befindet sich die *Quelle QP*. Sie ist lediglich in Ausnahmefällen aktiv und kann somit als *periodisch* bezeichnet werden. QP schüttet sehr unregelmäßig, und zwar für nur jeweils wenige Tage bis Wochen während extremer Wasserhöchststände. Dann kann eine Schüttung von über 1 l/s erreicht werden. Die hydrogeologische Funktion von QP wird im Rahmen einer Gesamtbetrachtung des Grundwassersystems am Büchelberg erläutert werden.

3.0. Hydrogeologische Untersuchungen

3.1. Methoden

Die Beobachtung des Quellverhaltens und die Messung von Quellparametern lassen - in Verbindung mit den geologischen bzw. hydrogeologischen Rahmenbedingungen - Aussagen über den Wassertransport in einem lokalen Einzugsgebiet innerhalb der hier anstehenden Kluftgesteine zu. Im vorliegenden Fall wurden Werte für die Quellschüttung und der Parameter der elektrischen Leitfähigkeit herangezogen.

Die Quellschüttung wird hauptsächlich durch die Eigenschaften des Grundwasserleiters, durch die Größe des Einzugsgebietes, durch die Höhe der Grundwasserneubildung und durch die Art des Quellaustritts bestimmt. Schwankungen in der Schüttung sind auf ein Auffüllen des Grundwasserleiters nach Niederschlägen bzw. auf ein Leerlaufen während niederschlagsarmer Zeiten zurückzuführen. Sie spiegeln deshalb die Durchlässigkeit und Speichereigenschaften des Untergrundes wider. Ausgeprägte Schüttungsschwankungen infolge von Niederschlagsereignissen zeigen schnelle Fließwege an, wogegen eine gleichmäßige Schüttung auf langsame und homogene Fließwege hindeutet. Der Schüttungsgang muß deshalb stets in Beziehung zu den örtlichen hydrologischen

Daten (v.a. Niederschlag) gesetzt werden. Da in dieser Studie eine direkte Messung der Quellschüttungen nicht möglich war, wurde diese vor Ort qualitativ bzw. semi-quantitativ abgeschätzt und in Schüttungsbereiche unterteilt.

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein physikalischer Summenparameter, der eine erste grobe Einstufung von Quellenwässern im Gelände erlaubt. Sie charakterisiert qualitativ die Summe der elektrolytisch gelösten Stoffe des Wassers. Bei Grundwasser entspricht die elektrische Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$ in etwa dem Grad der Mineralisierung in mg/l (HÖLTING 1996). Für Gneise und Glimmerschiefer sind aufgrund der nur langsamen Zersetzung laut MATTHESS (1994) in den entsprechenden Wässern nur geringe Lösungsinhalte von meist weniger als $300 \text{ mg}/\text{l}$ zu erwarten. Verbleibt Regenwasser nach der Versickerung nur kurz im Untergrund, so reicht diese Verweilzeit meist nicht aus, um signifikante Stoffmengen aus dem Gestein zu lösen. Deshalb zeigen Quellen mit einem geringen Lösungsinhalt des Wassers, also einer geringen elektrischen Leitfähigkeit, den Wiederaustritt relativ frisch infiltrierten Regenwassers an. Andersherum läßt eine hohe Leitfähigkeit des Quellwassers auf lange Verweilzeiten im Untergrund und älteres Grundwasser schließen. Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgte mittels kalibrierter Meßsonde.

Die beiden Parameter Schüttung und elektrische Leitfähigkeit erlauben - vor allem in Kombination - Rückschlüsse auf die Art des hydrogeologischen Systems und die relative Verweildauer des Wassers im Untergrund. Dabei sind gerade ausgeprägte Schwankungen der Parameter hilfreich, um verschiedenen Speicheranteile und deren zeitliche Variabilität zu erfassen. Beide Parameter wurden deshalb für die Quelle Q2 in zwei verschiedenen Zeitmaßstäben betrachtet: Einerseits über ein gesamtes hydrologisches Jahr mit seinen Perioden hoher und geringer Grundwasserneubildung, um Informationen über das langfristige Speicherverhalten des Kluffgrundwasserleiters zu erhalten; andererseits während eines konkreten Niederschlagsereignisses, wobei das Ansprechen der Quelle das kurzfristige Fließverhalten anzeigt. Ergänzende Interpretationen mit Hilfe von hydrochemischen Detailanalysen werden bei anderer Gelegenheit präsentiert werden.

3.2. Messungen des Jahresgangs

Während der Beobachtung der Quelle Q2 über ein volles hydrologisches Jahr (1999/2000) wurde mindestens einmal monatlich ihre Wasserschüttung bestimmt. Der entsprechende Jahresgang, und parallel dazu die Monatssummen des Niederschlages, sind in Abb. 4 dargestellt. Im Jahresmittel trat an Q2 etwa 1 l/s aus, also im Untersuchungsjahr insgesamt ca. 30.000 m³.

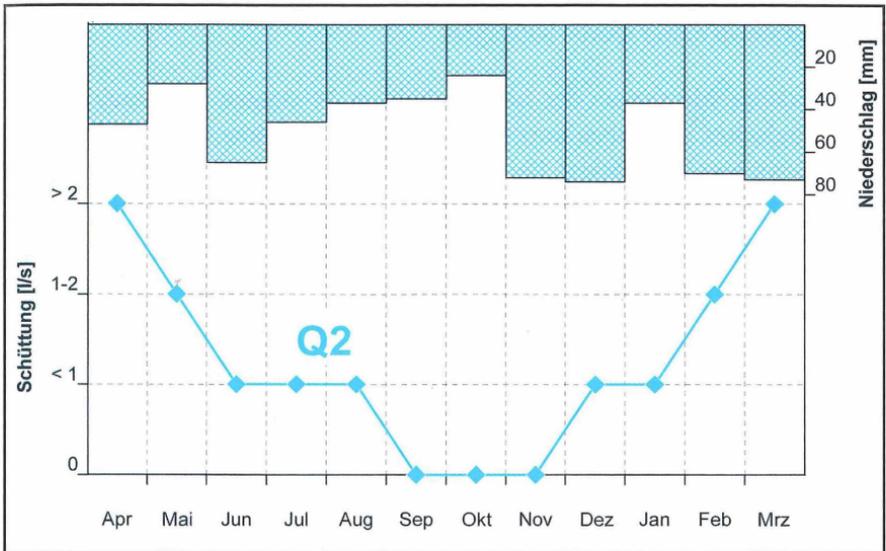


Abb. 4: Hydrogramm der Quelle Q2 für den Zeitraum 1999/2000 mit Jahresgang der monatlich abgeschätzten Schüttung. Zum Vergleich die monatlichen Niederschlagsmengen an einer Wetterstation in Aschaffenburg.

Für Q2 sind starke jahreszeitliche Schüttungsschwankungen mit einem Maximum im Frühling und einem Minimum im Herbst zu erkennen. In den Monaten September, Oktober und November lag die Quelle Q2 trocken. Dies liegt zum einen daran, daß der Niederschlag in den Sommermonaten geringer als im Winter ausfällt. In Verbindung mit einer erhöhten Verdunstung in der warmen Jahreszeit ergibt sich daraus eine im Vergleich zum Rest des Jahres deutlich reduzierte Grundwasserneubildung. Q2 fing erst wieder im Dezember als Folge der einsetzenden Herbst- und Winterniederschläge und der sinkenden Verdunstungsrate an zu schütten, mit einem deutlichen Anstieg bis auf etwa 4 l/s im März.

Die hohe Schüttungsvariabilität der Quelle deutet an, daß die Speicherkapazität des alimentierenden Gesteins relativ gering und das durch Niederschläge angesammelte Grundwasser relativ schnell wieder aufgebraucht ist. Die Tatsache, daß die Quelle dann nicht mehr über einen ausreichenden Wasserspeicher verfügt, verweist auf ein heterogenes Milieu. Nur allein aufgrund der in Abb. 4 dargestellten Schüttungskurve könnte man annehmen, der Kluftspeicher der Quelle Q2 würde im Winter aufgefüllt und liefere danach kontinuierlich leer. Zusätzliche Untersuchungen werden ein differenzierteres Bild der Grundwassersituation an dieser Quelle aufzeigen.

Regelmäßige Messungen der Leitfähigkeit im 14-tägigen Rhythmus über ein hydrologisches Jahr haben trotz hoher Schwankungsbreite keinen kontinuierlichen Gang erkennen lassen. Dies lässt darauf schließen, daß die Leitfähigkeit keinen jahreszeitlichen Variationen folgt, sondern kurzfristig mit einzelnen Niederschlagsereignissen korreliert ist.

3.3. Niederschlagsbezogene Messungen

An Quellen, welche aus heterogenem Gestein gespeist werden, kann durch Dokumentation des direkten Ansprechens der Quelle auf einzelne Niederschlagsereignisse die Art des Grundwasserflusses häufig gut erfaßt werden. Im Frühjahr 2004 wurden deshalb die Quellparameter von Q2 über einen längeren Zeitraum kontinuierlich erhoben, wobei in der Regel alle 2 Tage die elektrische Leitfähigkeit bestimmt und die Quellschüttung qualitativ abgeschätzt wurde. Zur besseren Interpretierbarkeit der Daten von Q2 wurden die gleichen Parameter parallel dazu an der benachbarten Quelle Q3 bestimmt. Die Meßergebnisse an Q2 und Q3, sowie die täglichen Niederschlagsmengen, sind in Abb. 5 vergleichend dargestellt.

Im Untersuchungszeitraum fielen Niederschläge unterschiedlicher Intensität. Es ist jedoch zu beachten, daß die aufgeführten Niederschlagswerte nicht direkt im Einzugsgebiet der Quellen erhoben wurden. Da die Niederschlagsverteilung kleinräumig sehr variabel sein kann, dürfen diese Niederschlagshöhen nur als Richtwerte herangezogen werden. Allerdings stimmen die aufgezeichneten Niederschlagsereignisse gut mit im Untersuchungsgebiet gemachten Beobachtungen überein.

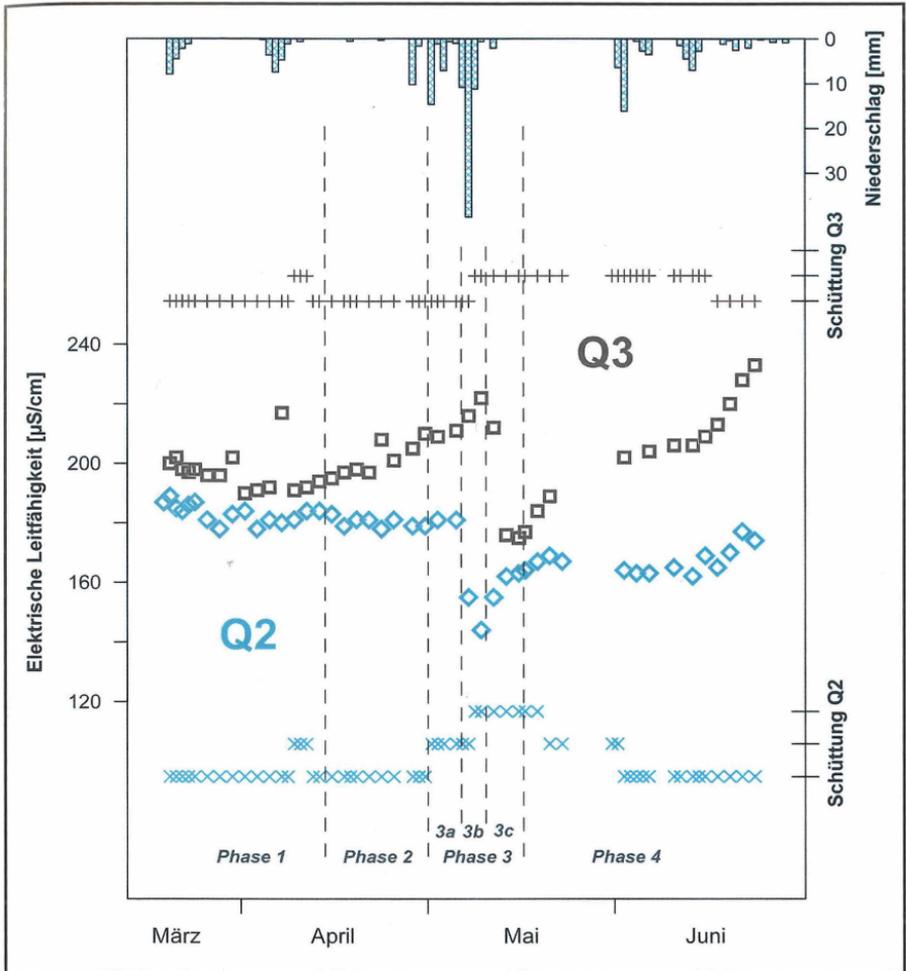


Abb. 5: Zusammengesetztes Hydrogramm der Quellen Q2 (unten) und Q3 (oben) von März bis Juni 2004 mit jeweils elektrischer Leitfähigkeit und Quellschüttung (Schüttungsangaben sind rein qualitativ und jeweils nur relativ zum Normalzustand der einzelnen Quelle zu verstehen: normal, erhöht, hoch). Zum Vergleich Tagessummen des Niederschlags. Die Betrachtung der Quellparameter während konkreter Niederschlagsereignisse erlaubt die Aufteilung des Hydrogramms in mehrere Phasen (siehe Text).

Der Vergleich beider Quellen mit jeweils zeitgleicher Erhebung der Schüttung und der elektrischen Leitfähigkeit ermöglicht eine grundlegende Interpretation der örtlichen Grundwasserverhältnisse. Das Hydrogramm der Abb. 5 läßt sich dabei in mehrere kennzeichnende Phasen unterteilen:

Phase 1: Zu Beginn der Meßperiode kommt es nur zu geringen bis mäßigen Niederschlägen. Diese reichen nicht aus, um an den Quellen eine signifikante Reaktion hervorzurufen. Vielmehr bleiben Schüttung und Leitfähigkeit an beiden Quellen weitgehend konstant. Insgesamt kommt es in dieser Phase zu keiner Neubildung des Grundwassers. Vielmehr werden die Niederschlagsmengen durch Verdunstung aufgebraucht und/oder füllen zunächst Wasserdefizite im Boden und in geringer durchlässigen Gesteinsbereichen auf. Die Quellen werden in dieser Phase durch kontinuierlich auslaufende Wasserreservoirs im Untergrund gespeist. Die an beiden Quellen ähnliche elektrische Leitfähigkeit deutet darauf hin, daß sie zu großen Teilen aus dem gleichen Wasserspeicher gespeist werden.

Phase 2: Auch im weiteren Verlauf fallen vereinzelt Niederschläge, ohne jedoch einen signifikanten Einfluß auf das Quellverhalten von Q2 zu haben. An Q3 kommt es in dieser Phase jedoch bei gleichbleibender Schüttung zu einer fortschreitenden Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit. Offenbar wird durch infiltrierenden Regen bereits im Untergrund befindliches Wasser mobilisiert, ohne daß frisches Wasser selbst die Quelle erreicht. Dieser mobilisierte Grundwasseranteil stammt dann aus geringer durchlässigen Bereichen mit erhöhten Verweilzeiten und damit höherer elektrischer Leitfähigkeit.

Phase 3: Anfang Mai kommt es dann zu starken Niederschlägen im Einzugsgebiet, welche ein direktes Ansprechen beider Quellen bewirken. Zunächst kommt es in einer Phase 3a zu einem schnellen Schüttungsanstieg an Q2, allerdings ohne Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit. Es wird also aus dem bestehenden unterirdischen Speicher zusätzliches Wasser mobilisiert. Frisch infiltrierendes Niederschlagswasser mit niedriger elektrischer Leitfähigkeit erreicht die Quelle Q2 in dieser Phase allerdings noch nicht. Erst eine knappe Woche nach dem Schüttungsanstieg kommt es zu einem massiven Abfall der Leitfähigkeit an Q2, bedingt durch die zunehmende Zumischung gering mineralisierten Niederschlagswassers (Phase 3b). Bereits nach weiteren 2-3 Tagen liegt an Q2 das Minimum der Leitfähigkeitswerte vor, wobei zeitgleich die Quellschüttung ihren Höchstwert erreicht. Q3 spricht auf dasselbe Niederschlagsereignis weniger schnell an. Erst in einer Phase 3c kommt es an Q3 ebenfalls zu einem deutlichen Abfall der Leitfähigkeit und niedrig mineralisier-

tes Regenwasser trifft an der Quelle ein. Zuvor hatte sich in Phase 3b der Anstieg der Leitfähigkeit an Q3 sogar noch verstärkt, sodaß das Maximum der Leitfähigkeit an Q3 zeitlich mit dem Minimum an Q2 zusammenfällt. Q3 besitzt also gegenüber Q2 eine um etwa 5 Tage verzögerte Ankunft von frisch infiltriertem Niederschlagswasser. Dabei kommt es an Q2 zu einem deutlichen Schüttungsanstieg, während die mengenmäßige Reaktion an Q3 eher verhalten bleibt.

Phase 4: Auch der Wiederanstieg der elektrischen Leitfähigkeit und der Rückgang der Schüttung vollziehen sich an Q2 schneller als an Q3. Nun erreicht die Leitfähigkeit an beiden Quellen wieder ihren Ausgangswert von vor dem Niederschlagsereignis, und Q2 sinkt wieder auf Normalschüttung. Die Schüttung von Q3 bleibt jedoch noch längere Zeit leicht erhöht. Der direkte Einfluß des Niederschlags geht in dieser Phase zurück. Neue Niederschläge reichen nicht aus, um eine erneute Reaktion der Quellen auszulösen, sondern führen eher zu einer Wiederholung der für Phase 2 beschriebenen Vorgänge. Auffallend ist, daß die Leitfähigkeit an Q3 jetzt noch höhere Werte erreicht als vor dem Niederschlagsereignis.

Die beschriebenen Phänomene während eines konkreten Niederschlagsereignisses können herangezogen werden, um für das Untersuchungsgebiet ein Modellkonzept zum Fließ- und Speicherverhalten im Grundwasserleiter zu erstellen.

4.0. Schlußfolgerungen

4.1. Funktionsweise der Quelle

4.1.1. Fließ- und Speicherverhalten

Während mehrere höher gelegene Quellen am Büchelberg nur den obersten porösen Gesteinsbereich entwässern, handelt es sich bei Q2 um eine Quelle, die von der tieferen Verwitterungsschicht des Kluftgesteins gespeist wird (Abb. 2). Dies wird z.B. daran deutlich, daß die Temperatur des Quellwassers hier deutlich weniger von der Oberflächentemperatur beeinflusst wird (SINREICH 2002). Zudem belegen die hohen Schüttungsschwankungen bis hin zum Trockenfallen

der Quelle ein eher geringes Rückhalte- und Speichervermögen, was für heterogene Medien charakteristisch ist.

Für die Quellschüttung von Q2 hat sich gezeigt, daß sich diese sowohl mit den jahreszeitlichen Variationen der Grundwasserneubildung korrelieren lässt, als auch mit einzelnen Niederschlagsereignissen. Dies wiederum deutet auf einerseits längerfristige Speicheranteile und andererseits kurzfristige Fließanteile hin. Eine genauere Betrachtung der Hydrogramme erlaubt die Aufteilung in drei unterschiedliche Fließ- bzw. Speicherkomponenten (Abb. 6).

Q2 zeichnet sich durch ein sehr schnelles und deutliches Ansprechen auf Niederschlagsereignisse aus. Dabei kommt es zu einem Anstieg der Quellschüttung und einem Abfall der elektrischen Leitfähigkeit des Quellwassers. Beides ist die Folge eines Verdünnungseffektes des bereits zuvor im Untergrund gespeicherten Grundwassers mit frisch infiltriertem, niedrig mineralisiertem Niederschlagswasser. Letzteres bleibt in dieser Phase nicht lange genug im Untergrund, um gelöste Stoffe in signifikanter Menge aufzunehmen. Die Verweilzeit dieser Fließkomponente zwischen Infiltration und Ankunft an der Quelle kann grob abgeschätzt werden, indem man die Zeitdifferenz zwischen Niederschlagsereignis und dem Minimum der Leitfähigkeit bestimmt. Diese beträgt

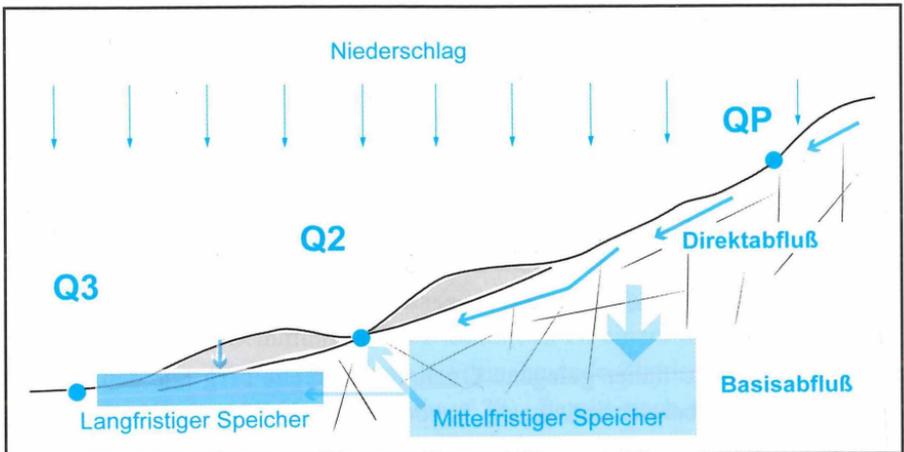


Abb. 6: Schematisierte Darstellung der dynamisch-statischen Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsgebiet (Profilschnitt entlang der Quellen QP, Q2 und Q3; stark überhöht). Pfeile zeigen die Komponenten des unterirdischen Direkt- und Basisabflusses an; Flächen stehen für Speicherräume, welche Q2 und Q3 speisen (mittelfristiger Speicher im Klufnetzwerk und langfristiger Speicher im Porengrundwasserleiter).

im vorliegenden Fall ca. 1 Woche. Bei einer mittleren Erstreckung des Einzugsgebietes von Q2 von mindestens 300 m (SINREICH 2002) erhält man eine Fließgeschwindigkeit des Grundwassers für diesen schnellen Fließanteil von etwa 2 m/h. Die deutliche Schüttungszunahme an Q2 ist hauptsächlich auf diesen Direktabfluß zurückzuführen. Diese Phase geht mit einer Trübung des Quellwassers von Q2 einher, was durch turbulentes Fließen an bevorzugten Fließwegen und damit einer Mobilisierung von Feinpartikeln im Grundwasserleiters erklärt werden kann.

Diese *kurzfristige* Fließkomponente (*Direktabfluß*) fehlt an Q3 bzw. ist dort nur gedämpft erkennbar. Die zeitliche Verzögerung zwischen dem Beginn des Niederschlagsereignisses und dem Minimum der elektrischen Leitfähigkeit liegt hier bei ca. 2 Wochen, ist also rund doppelt so hoch wie an Q2. Die Schüttung steigt dabei nur geringfügig an. Durch den infiltrierenden Regen wird wohl zunächst Wasser aus einem Speicherreservoir hoher elektrischer Leitfähigkeit mobilisiert, bevor frisches Wasser an der Quelle ankommt, dies dann mit deutlich geringerer Geschwindigkeit als an Q2.

Neben dem Direktabfluß verfügt Q2 über einen Speicherraum, welcher die Quelle auch in Perioden ohne Grundwasserneubildung speist. Ein Teil des Niederschlages, welcher nicht unmittelbar wieder an Q2 austritt, wird für das Auffüllen dieses *mittelfristigen* Speichers verwendet. Er liefert einen Großteil des Wassers von Q2, vor allem in den Phasen zwischen einzelnen Niederschlagsereignissen (*Basisabfluß*). Bereits etwa 10 Tage nach dem Maximum des Direktabflusses dominiert an Q2 wieder der Basisabfluß. Dabei gleicht sich das Wasser, welches während der Niederschläge neu zugeführt wurde, zunehmend den chemischen Eigenschaften des bereits zuvor gespeicherten Grundwassers an. Dieser Speicheranteil ist in den Sommermonaten leergelaufen oder zumindest ist der Grundwasserspiegel unterhalb des Niveaus von Q2 gesunken. Die mittlere Verweilzeit des Wassers in diesem Speicher beträgt sicherlich bis zu mehrere Monate. In trockenen Jahren mit geringer Grundwasserneubildung steht in diesem Speicherraum insgesamt weniger Wasser zur Verfügung. Dann weist die Quelle Q2 gegenüber dem Untersuchungsjahr 1999/2000 eine bis zu mehreren Monaten verkürzte Schüttungsperiode auf. Vermutlich erhält auch Q3 Zuflüsse aus der mittelfristigen Fließkomponente des Kluftspeichers. Allerdings kann das Verhalten von Q3 nicht ausschließlich mit diesem Speicher erklärt werden.

Während zur Interpretation des Jahresgangs und der Reaktion auf einzelne Niederschlagsereignisse an Q2 ein 2-Komponentenmodell ausreicht (Direktabfluß und mittelfristiger Basisabfluß), benötigt man für Q3 eine zusätzliche Speicherkomponente. Dieser langfristige Basisabfluß ist durch eine hohe elektrische Leitfähigkeit charakterisiert. Er bewirkt auch das relativ konstante Schüttungsverhalten von Q3 und sein relativer Anteil an der Schüttung der Quelle nimmt während niederschlagsloser Perioden immer mehr zu. Q2 kann auf diesen längerfristigen Speicher offenbar nicht zurückgreifen. Deshalb fällt die Quelle in den Sommermonaten trocken, während an Q3 noch ausreichend Wasser zur Verfügung steht.

4.1.2. Quelltyp und -mechanismus

Hydrogeologisch können die einzelnen Speicherräume verschiedenen Grundwasserbereichen zugeordnet werden. Der unterirdische Direktabfluß geschieht hauptsächlich entlang geklüfteter Bereiche im Festgestein mit sehr hoher Heterogenität, z.B. an erweiterten tektonischen Trennflächen oder Störungszonen. Der mittelfristige Speicheranteil, welcher den Basisabfluß von Q2 sicherstellt, stammt dagegen aus den weniger heterogenen Bereichen der Auflockerungszone des Festgesteins. Dazu gehört vor allem das Netzwerk aus unterschiedlich erweiterten Klüften, untergeordnet aber auch poröse Bereiche der Verwitterungsdecke (Abb. 2). Die Quelle Q2 ist hydrogeologisch also tatsächlich an den Klüftgrundwasserleiter gebunden, auch wenn sie an ihrem Austritt nicht als Klüftgesteinsquelle zu erkennen ist. Dagegen ist der langfristige Speicher, welcher zu einem bedeutenden Teil die Quelle Q3 alimentiert, eher als Porengrundwasserleiter oberhalb der Festgesteine anzusehen. Dieser besteht aus geringer durchlässigen quartären Ablagerungen am Fuße des Büchelberg.

Bei der Gesamtbetrachtung des hydrogeologischen Systems am Büchelberg zeigt sich eine weitere Besonderheit des Klüftgrundwasserleiters. Es gibt nämlich hydrologische Situationen, während derer im Untersuchungsgebiet für einige Tage ein weiterer Quellaustritt entsteht, die periodische Quelle QP. Dies geschieht nur bei extremer Grundwasserneubildung, und zwar im Frühjahr, entweder bei außerordentlichen Niederschlagsmengen innerhalb kurzer Zeit oder bei plötzlicher Schneeschmelze. Seit Beginn der Quellbeobachtung am Büchelberg im Jahr 1999 war dies nur zweimal der Fall: Im März 2002 wurde aufgrund rapide umschlagender Temperaturen die vorhandene Schneedecke inner-

halb weniger Tage geschmolzen und führte so zu außergewöhnlichen Infiltrationsmengen. Im April 2005 waren dagegen Starkniederschläge für die hohe Grundwasserneubildung verantwortlich. Die Schüttung an QP erreichte in diesen kurzen Perioden jeweils mehrere l/s. Anscheinend ist zu dieser Jahreszeit der Kluftwasserspeicher soweit aufgefüllt, daß bei einem konkreten Ereignis die Grundwasserneubildung kurzfristig größer sein kann, als das System aufzunehmen in der Lage ist. In diesem Fall entwässert ein Teil des Direktabflusses nicht an Q2, sondern am höher gelegenen Austritt QP, der ansonsten ungenutzt bleibt. QP kann damit als Hochwasserüberlauf des Kluftgrundwasserleiters bezeichnet werden.

Diese Tatsache erlaubt wiederum Rückschlüsse auf die Funktionsweise von Q2. Wenn ein so weit hangaufwärts gelegener Überlauf aktiviert werden kann, stellt sich die Frage, auf welcher Höhe der Grundwasserspiegel im Bereich von Q2 liegt. Normalerweise liegen Quellen dort, wo der freie Grundwasserspiegel auf die Geländeoberfläche trifft und das Grundwasser dann frei austreten kann. Manchmal fallen Grundwasseroberfläche und Grundwasserdruckfläche aber nicht überein, wenn nämlich der Grundwasserleiter von schlecht durchlässigen Schichten überdeckt wird, das Grundwasser also nicht so hoch ansteigen kann,



Abb. 7: Aufsprudelndes Wasser an der Quelle Q2 als Anzeichen artesisch gespannter Grundwasserhältnisse. Die Steighöhe des Wassers innerhalb des in den Untergrund eingelassenen Rohres gibt das Niveau des Druckwasserspiegels an (ca. 20 cm über Quellwasserspiegel).

wie es seinem hydrostatischem Druck entspräche. Unter diesen Verhältnissen liegt gespanntes Grundwasser vor. Liegt die Grundwasserdruckfläche sogar höher als die Geländeoberfläche, so ist das Grundwasser artesisch gespannt (HÖLTING 1996).

Befindet sich im Bereich artesisch gespannten Grundwassers eine Quelle, so tritt dort das Grundwasser unter Druck aus. Diese Besonderheit im Quellmechanismus trifft auch auf Q2 mit seinem aufsprudelnde Quellwasser zu (Abb. 7). Zur Überprüfung dieser Annahme und zur Feststellung der Druckspiegelhöhe wurde im sandigen Untergrund des Quelltopfes ein dünnes Rohr bis zum Festgestein in ca. 60 cm Tiefe eingelassen. Wie in Abb. 7 ersichtlich, stellt sich in dieser Situation im Rohr ein Wasserpegel ein, dessen Höhe der Grundwasserdruckfläche an dieser Stelle entspricht. Während der Messung im April 2005 lag diese Wasserhöhe 20 cm über der freien Quellwasserfläche bzw. Geländeoberfläche.

Am westlichen Hangfuß des Büchelberg liegen also gespannte, teilweise sogar artesische Grundwasserverhältnisse vor, verursacht durch quartäre, gering durchlässige Ablagerungen in diesem Bereich. Am Quellaustritt Q2 ist diese wasserstauende Schicht entlang einer Erosionsrinne abgetragen, sodaß Grundwasser aufsteigen kann. Bei niedrigen Wasserständen, wenn Q2 trockenliegt, kann der Grundwasserspiegel hier aber auch unterhalb der Grenzschrift zwi-

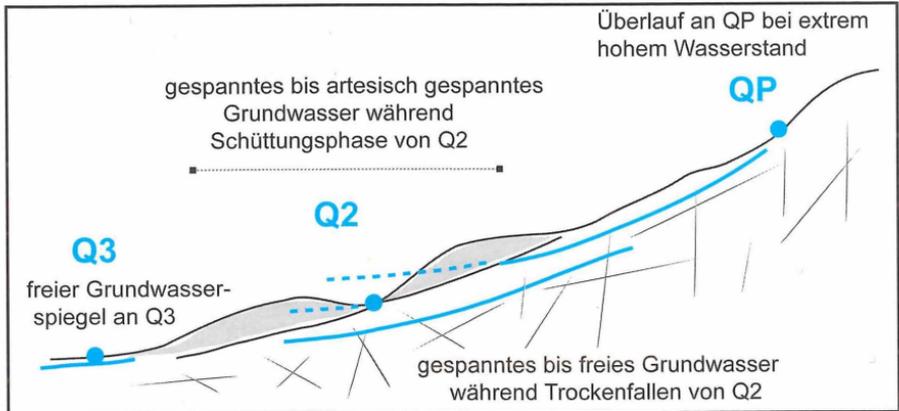


Abb. 8: Skizzierung der Lage des Grundwasserspiegels im Bereich der Quelle Q2 für unterschiedliche hydrologische Situationen. Bei hohem Wasserstand ist Q2 aktiv und es herrschen gespannte bis artesisch gespannte Grundwasserverhältnisse (Druckwasserspiegel innerhalb bzw. oberhalb der Deckschichten; gestrichelte Linie). In Bereichen ohne Deckschichten liegt ein freier Grundwasserspiegel vor (durchgezogene Linie), ebenso wie an Q2 bei niedrigem Wasserstand und Trockenfallen der Quelle.

schen Festgestein und Lockergesteinsbedeckung liegen. Dann ist im Kluftgrundwasserleiter ein freier Grundwasserspiegel ausgebildet. Am zeitlichen Übergang von Schüttungsphase zu Trockenfallen - und umgekehrt - liegt die Grundwasserdruckfläche genau auf dem Niveau der Quellaustritts. Die beiden Situationen von artesisch gespanntem und freiem Grundwasser sind in Abb. 8 schematisch dargestellt.

Der Druckwasserspiegel liegt umso höher, je weiter der Kluftspeicher mit Wasser gefüllt ist. Mit zunehmender Höhe des Druckwasserspiegels nimmt auch die Schüttung an Q2 zu. Bei hohem Wasserstand und gleichzeitig sehr starker Grundwasserneubildung genügt aber der Wasseraustritt an Q2 nicht, um das System ausreichend zu entwässern. Dann wird mit QP ein zusätzlicher Wasseraustritt aktiviert, der oberhalb der quartären Deckschichten liegt und so einen Überlauf des Kluftgrundwasserleiters ermöglicht.

4.2. Entstehung der Quelle

Durch die bisher aufgeführten Ergebnisse zur Quellbeobachtung kann eine Hypothese zur Entstehung der Quelle Q2 aufgestellt werden. Diese basiert auf einer gleichzeitigen Einbeziehung des Fließ- und Speichermodell für den Kluftgrundwasserleiters (Abb. 6), des Quellmechanismus von Q2 mit gespannten Grundwasserverhältnissen (Abb. 7), der Existenz des Überlaufs QP (Abb. 6), sowie der Geländemorphologie im Untersuchungsgebiet (Abb. 3). Generell wird davon ausgegangen, daß die Quelle Q2 nicht von Anfang an die Hauptentwässerung des Kluftgrundwasserleiters darstellte, sondern sich erst infolge natürlicher landschaftsmorphologischer und hydrogeologischer Umgestaltungsprozesse gebildet hat. Die Argumentationskette zur Entstehung von Q2 wird nachfolgend erläutert und ist in Abb. 9 graphisch zusammengefaßt.

QP als Überlauf von Q2: Die Quelle Q2 ist an einen Kluftgrundwasserleiter gebunden. Dort treten relativ hohe Schwankungen des Grundwasserspiegels auf, wodurch zeitweise artesisch gespannte Grundwasserverhältnisse herrschen, während andererseits die Quelle Q2 zeitweise trockenfällt. Die Eigenschaften der Quelle QP lassen vermuten, daß dieser Wasseraustritt an denselben Kluftgrundwasserleiter wie Q2 gebunden ist und bei extremem Hochwasserstand mit

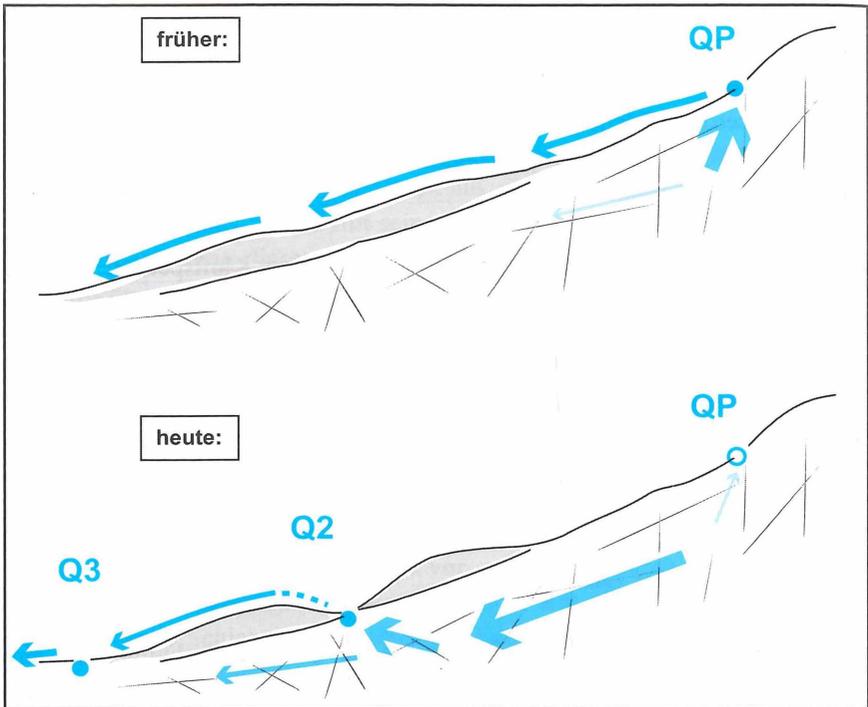


Abb. 9: Entwässerungssituation im Untersuchungsgebiet vor der Entstehung von Q2 (oben) und aktuelles hydrogeologisches System (unten). Durch teilweise Erosion der Deckschicht und damit Freilegung des Wasseraustrittes Q2 kommt es zu einem Wechsel von ober- zu unterirdischer Entwässerung. Die oberirdische Entwässerung beginnt nun auf deutlich tieferem topographischem Niveau und QP dient nur noch als periodischer Hochwasserüberlauf.

dieser in hydraulischer Verbindung steht. QP ist demnach der periodische Überlauf des Wasserspeichers von Q2.

Geländemorphologie: Die Quellen Q2 und QP befinden sich entlang der gleichen rinnenförmigen Geländestruktur. QP liegt am oberen Ende dieser Rinne, Q2 mehr als 300 m hangabwärts davon in Richtung WNW. Dort, am Hangfuß des Büchelberg, durchschneidet die Rinne gering durchlässige Ablagerungen aus Lockergestein. Deshalb steht im Quelltopf von Q2 in einer Tiefe von wenigen Dezimetern bereits Festgestein an. Die morphologische Rinne knickt dort nach SW ab und nimmt ihren weiteren Verlauf in Richtung Kührhgraben, der aktuellen oberflächlichen Entwässerbahn des Untersuchungsgebietes.

Erosionsstruktur: Die genannte Struktur kann nur als Erosionsrinne eines

Baches gedeutet werden, über den eine frühere oberirdische Entwässerung in den Kühruhgraben erfolgte. Diese oberirdische Entwässerungsbahn existiert heute nicht mehr. Um einen solchen ehemaligen Bachlauf zu erklären, muß es oberhalb dieser Rinne eine dauerhaft stark schüttende Quelle gegeben haben. Dafür kommt auf Grundlage der aufgeführten Ergebnisse nur der heutige periodische Quellaustritt QP in Betracht. Es kann also davon ausgegangen werden, daß früher QP als regulärer Entwässerungsort des Kluftgrundwasserleiters fungierte.

Freilegung von Q2: Da die Ablagerungen in der Umgebung von Q2 nur gering durchlässig sind und dort gespannte Grundwasserverhältnisse herrschen; kann dieser Quellaustritt vor der Erosion der Deckschicht nicht existiert haben. Im Zuge der Bacherosion wurde die Deckschicht dann entlang der Rinne abgetragen, bis an einem Punkt das anstehende Festgestein erreicht wurde. Erst zu diesem Zeitpunkt wurde eine Entwässerung des Kluftgrundwassers auf tiefem topographischem Niveau - nämlich an Q2 - möglich. Dies erklärt im Umkehrschluß, warum QP überhaupt als perennierende und schüttungsstarke Quelle existiert haben konnte, nämlich durch das Fehlen eines tiefen Auslasses im System und damit einem ständigen Überlaufen an QP.

Trockenfallen von QP: Existiert erst einmal eine Lücke in den Deckschichten und damit ein Quellaustrittspunkt an Q2, kommt es zu einem Absinken des Wasserspiegels im Kluftgrundwasserleiter. Tieferliegende Fließbahnen im Gestein werden mehr und mehr aktiviert, ebenso wie sich der Quellaustritt an Q2 durch aufsprudelndes Wasser weiter öffnen kann. Dieses Anzapfen des Grundwasserleiters in seinem unteren Bereich hat zur Folge, daß der Wasserstand im Normalfall nicht mehr bis zu QP reicht. QP verliert damit seine entwässernde Funktion und fällt trocken, wodurch es auch keinen Bachlauf mehr gibt. In der heutigen hydrologischen Situation bildet sich der Bach erst weiter hangabwärts, nämlich unterhalb von Q2. Die Quelle Q2 ist der aktuelle Hauptentwässerungspunkt des hydrogeologischen Systems.

Die Quelle QP hat sich also im wahrsten Sinne des Wortes selbst „das Wasser abgegraben“. Dies entspricht der allgemeinen Tendenz zur natürlichen Tieferlegung von Entwässerungsstrukturen und hydrogeologischen Systemen. Das Beispiel der Funktionsweise und Entstehung der Quelle Q2 am Büchelberg zeigt,

wie sich Landschaftsbild und Entwässerung aufgrund natürlicher Prozesse langfristig verändern können. Eine genaue zeitliche Einordnung der beschriebenen Vorgänge zur Quellverlegung ist mit den vorliegenden Informationen allerdings nicht möglich, wenngleich klar ist, daß dies nach Ablagerung der quartären Sedimente geschah. Die Erosion von mehrere Meter mächtigen Deckschichten ist ein längerfristiger Prozeß; der konkrete Umschwung der Entwässerung von QP nach Q2 kann dann aber - sobald der Kluftwasserspeicher erst einmal angezapft ist - sehr rasch erfolgt sein. Insgesamt stellt die beschriebene Situation am Büchelberg ein in dieser Anschaulichkeit und Nachvollziehbarkeit seltenes Beispiel für die Veränderung eines Kluftgrundwassersystems dar, und verdeutlicht, wie Grundwasserverhältnisse als Abbild räumlicher und zeitlicher Rahmenbedingungen angesehen werden müssen.

5.0. Zitierte Literatur

- ANDRES, G. & MATTHESS, G. (1962): Hydrogeologie. - In: WEINELT, W. Erläuterungen zur Geologische Karte von Bayern 1 : 25.000, Blatt Nr. 6020 Aschaffenburg. - 217-230; München (Bayer. Geol. Landesamt).
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie. - 441 S.; Stuttgart (Enke).
- LfW (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft) (2001): Grundwasser, der unsichtbare Schatz. - SpektrumWasser 2, 98 S.; München.
- MATTHESS, G. (1994): Die Beschaffenheit des Grundwassers. - Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 2, 499 S.; Berlin (Gebr. Bornträger).
- POCHON, A. & ZWAHLEN, F. (2003): Ausscheidung von Grundwasserschutz zonen in Kluftgesteinen. - Praxishilfe des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, 83 S.; Bern.
- Regierung von Unterfranken (Hrsg.) (2002): Wasser für Unterfranken - Wege zu einer nachhaltigen Wasserwirtschaft in der Region. - 32 S.; Würzburg.
- SINREICH, M. (2002): Grundwasser aus geklüfteten Gesteinen an Quellen des Büchelberg in Aschaffenburg, Bayern. - Nachr. naturwiss. Mus. Aschaffenburg, 106, 153-173.
- WEINELT, W. (1962): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25.000, Blatt Nr. 6021 Haibach. - 246 S.; München (Bayer. Geol. Landesamt).

Dank

Diese Studie war nur möglich dank des unermüdlichen Einsatzes des 2-beinigen und 8-pfötigen Probenahme-Teams.

Anschrift des Verfassers

Michael Sinreich
 Kettererstraße 6
 63739 Aschaffenburg
 michael@sinreich.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Nachrichten des Naturwissenschaftlichen Museums der Stadt Aschaffenburg](#)

Jahr/Year: 2006

Band/Volume: [108_2006](#)

Autor(en)/Author(s): Sinreich Michael

Artikel/Article: [Zur Funktionsweise und Entstehung einer Kluftgesteinsquelle 69-91](#)