Beiträge zur Hydrogeologie / 53 / Seiten 5–20 / Graz 2002

Hydrogeologie einer alpinen Bergsturzmasse (Schwarzwassertal, Vorarlberg)

Hydrogeology of an Alpine Rockfall Mass (Schwarzwasser Valley, Vorarlberg)

M. SINREICH[1]), N. GOLDSCHEIDER[2]) & H. HÖTZL[3])

Inhalt

Seite

1. Einleitung 5
2. Geologischer, morphologischer und hydrologischer Überblick 6
3. Hydrogeologische Untersuchungen 9
   3.1. Abflussbilanz und Speicherverhalten 9
   3.2. Hydrochemie 11
   3.3. Markierungsversuche 12
4. Hydrogeologische Modellvorstellung 15

Zusammenfassung 18

Literatur 19

Summary 20

1. Einleitung

Massenbewegungen stellen im alpinen Raum eine weit verbreitete Form tiefgreifender, geologisch junger Landschaftsumgestaltung dar. Dabei bewirkt die Hangbewegung in Form von Felsstürzen, Rutschungen und Talzuschüben nicht nur eine Neubildung der Geländemorphologie, sondern geht auch mit einer hydrogeologisch wirksamen Veränderung des ursprünglichen Gesteinsverbandes einher (z. B. R. DIKAU et al., 1996, D. FORD & D. W. WILLIAMS, 1989, M. MOSER & S. WEIDNER, 1998, A. K. TURNER & R. L. SCHUSTER, 1996).

[1]) Dipl.-Geol. Michael SINREICH, Centre d'Hydrogéologie (CHYN), Université de Neuchâtel, Rue Emile-Argand 11, CH-2007 Neuchâtel, Schweiz. E-mail: michael.sinreich@unine.ch

[2]) Dr. Nico GOLDSCHEIDER, Centre d'Hydrogéologie (CHYN), Université de Neuchâtel, Rue Emile-Argand 11, CH-2007 Neuchâtel, Schweiz. E-mail: nico.goldscheider@unine.ch

[3]) Prof. Dr. Heinz HÖTZL, Lehrstuhl für Angewandte Geologie (AGK), Universität Karlsruhe, Kaiserstrasse 12, D-76128 Karlsruhe, Deutschland. E-mail: heinz.hoetzl@agk.uni-karlsruhe.de

Je nach Ausgangsgestein, Deformation und Kinematik können sich innerhalb von Massenverlagerungen unterschiedliche Aquifertypen ausbilden. Gleitet der Massenkörper größtenteils im Verband ab, so entstehen infolge der Zerrüttung oft gut durchlässige Kluftaquifere. Bei Massenstürzen, die im Zuge ihrer Talfahrt einer hohen energetischen Beanspruchung unterliegen, überwiegen dagegen stärker zerrüttete Bereiche mit einer Zerlegung des Ausgangsgesteins in Lockermaterial. Hier ist die Ausbildung von lokalen Porengrundwasserleitern möglich.

Für Felsgleitungen liegen derzeit zahlreiche hydrogeologische Untersuchungen vor, die sich vor allem mit der Wasserzirkulation als auslösendes Moment für die Hangbewegung beschäftigen (z. B. H. HÖTZL, 1992, H. HÖTZL et al., 1994, M. MOSER, 1997, M. MOSER & J. KIEFER, 1988). Über die hydrogeologischen Verhältnisse innerhalb von Bergsturzmassen wurde bisher weniger berichtet (z. B. N. GOLDSCHEIDER, 2000, P. RAMSPACHER et al., 2000), auch wenn der Abgang von Bergstürzen oft nachhaltige hydrologische und geomorphologische Veränderungen nach sich zieht, wie die Verlegung von Wasserläufen und Wasserscheiden sowie die Entstehung von Stauseen und deren Schwemmsedimenten (G. ABELE, 1974).

Im vorarlberger Schwarzwassertal stellt die dortige Bergsturzmasse eine morphologische und hydrologische Besonderheit dar. Im Zuge karsthydrologischer Forschungen im Gebiet Hochifen-Gottesacker und Schwarzwassertal, die das Institut für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (AGK) seit 1996 betreibt, wurde auch die Bergsturzmasse in die Untersuchungen miteinbezogen (siehe N. GOLDSCHEIDER, 1997, M. SINREICH, 1998). Dabei sollten Erkenntnisse über das Strömungsverhalten des Grundwassers innerhalb der Ablagerung sowie über deren Funktion als Bindeglied zwischen ober- und unterirdischer Entwässerung gewonnen werden.

2. Geologischer, morphologischer und hydrologischer Überblick

Das Schwarzwassertal ist ein Seitental des Kleinwalsertals nahe des Alpennordrands im österreichischen Vorarlberg (Fig. 1). Der Talverlauf zeichnet die Deckengrenze zwischen Helvetikum und Penninikum nach, wobei die Faltenzüge der helvetischen Säntis-Decke in Richtung ESE unter die penninischen Flyschdecken abtauchen (G. WYSSLING, 1986). Das Helvetikum der orographisch linken Talseite wird von dem bis zu 100 m mächtigen kretazischen Schrattenkalk beherrscht, der die Karstgebiete Ifersgunten-Alp, Hoher Ifen und Gottesacker aufbaut (W. ZACHER, 1973). Diese werden ausschließlich unterirdisch entwässert, wobei die mergelige Drusberg-Formation den Liegendstauer unter dem Karstaquifer bildet, während der Glaukonitsandstein der Garschella-Formation und die Leistmergel der Amdener Formation die Funktion des Hangendstauers übernehmen (N. GOLDSCHEIDER & H. HÖTZL, 2000). Die rechte Talseite besteht aus sandig-tonigen Flyschserien und weist einen hohen Anteil an oberflächlichem Abfluss auf.

Der Bergsturz im oberen Schwarzwassertal ist quer zur Talrichtung vom Südhang der markanten Ifenplatte niedergegangen, die den verstümmelten Scheitel der Ifen-Antiklinale darstellt (III in Fig. 1). Frühere Bearbeiter stellen das Sturzereignis ins Postglazial (G. WAGNER, 1950, P. SCHMIDT-THOMÉ, 1960). Aufgrund geomorphologischer Befunde geht H. R. VÖLK (2001) jedoch davon aus, dass der Bergsturz schon im spätglazialen Gschnitz-Stadium, 10 000–11 000 Jahre vor heute, auf den bereits stark zurückgezogenen Schwarzwassertal-Gletscher niederging und von diesem geringfügig

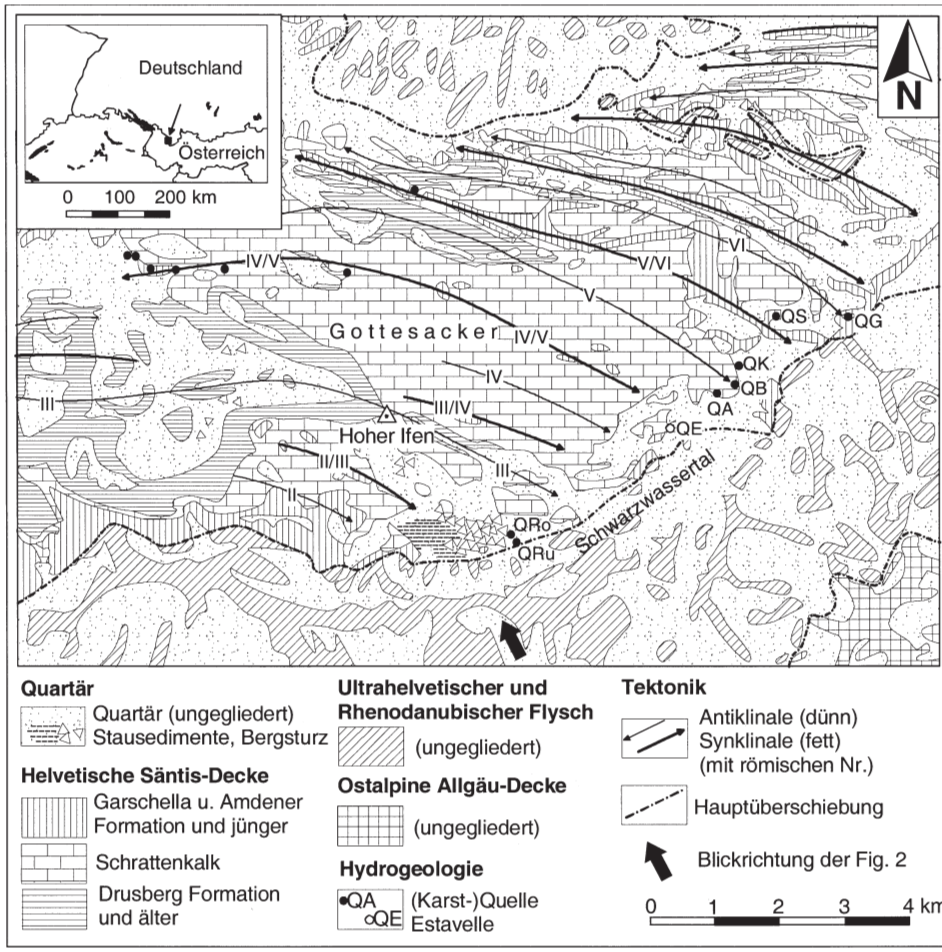

Fig. 1: Geologische und hydrogeologische Übersichtskarte des Gebietes Hochifen-Gottesacker mit Lage der Bergsturzmasse südöstlich des Hohen Ifen (N. GOLDSCHEIDER, 2002, leicht verändert). Geological and hydrogeological map of the Hochifen-Gottesacker area, with rockfall mass located southeast of the Hoher Ifen mountain (modified after N. GOLDSCHEIDER, 2002).

talwärts transportiert und umgestaltet wurde. Der Abgang selber wurde durch das Zusammenwirken verschiedener interner und externer Ursachen begünstigt (P. SCHMIDT-THOMÉ, 1960). Der durch Zerklüftung und Verkarstung in seiner Scherfestigkeit herabgesetzte Schrattenkalk fällt hier hangparallel mit 25–30° nach S ein. Die Mergel der liegenden Drusberg-Formation dienten der Massenbewegung als durch Karstwässer gut geschmierter Gleithorizont. Daneben führte die quartäre glaziale Übersteilung der Talflanken, insbesondere die Unterschneidung des Schrattenkalk-Schichthangs, zu einer Zunahme der Schubspannungen. Für die Destabilisierung eines solchen Zustands labilen Gleichgewichts ist als auslösendes Moment meist schon eine kurzfristige Veränderung im Bergwasserspiegel ausreichend (H. HÖTZL et al., 1994).

Bei seiner Talfahrt erreichte das Bergsturzmaterial eine Fahrbahnlänge von etwa 1400 m und brandete damit am Gegenhang des relativ engen Talraums auf. Die maximale

Breite des Bergsturzkegels beträgt 1200 m, die Gesamtfläche etwa 1 km². P. SCHMIDT-THOMÉ (1960) beziffert die Mächtigkeit der Bergsturzmasse im Talgrund mit mindestens 60 m bei einem abgeschätzten Gesamtvolumen von 7,2 Mio. m³. G. WAGNER (1950) kommt auf Werte von höchstens 45 m Mächtigkeit bei insgesamt 10 Mio. m³. Der Schrattenkalk, der im obersten Talabschnitt das Karstgebiet rund um die Ifersgunten-Alp aufbaut, zieht hier entlang der Melköden-Synklinale (II/III in Fig. 1) unterhalb der Bergsturzmasse hindurch und steht an deren östlichem Ende wieder an. Es handelt sich in diesem Bereich also um begrabenen Karst.

Das Ablagerungsgebiet der Bergsturzmasse weist das kleinhügelige Relief einer Tumuli-Landschaft auf. Die Bergsturzfracht selbst ist sehr inhomogen aufgebaut. Sie besteht hauptsächlich aus kalkigem Lockerschutt mit bis zu hausgroßen Blöcken aus Schrattenkalk. Stellenweise ist der Schutt brekziös in psammitischen Grus aus zerriebenem Kalk und Mergel eingelagert. Nach G. ABELE (1974) ist eine geringe interne Strukturerhaltung der Bergsturzfracht oft als Folge einer Verringerung der primären Gesteinsfestigkeit durch Verkarstung und intensive Zerklüftung zu verstehen.

Der Bergsturz hatte die Abriegelung des oberen Teils des Schwarzwassertals zur Folge. Er stellt damit eine Barriere für den das Tal entwässernden Schwarzwasserbach dar, dessen mitgeführte Sedimentfracht zur Ablagerung von bis zu 25 m mächtigen Sedimenten führte (G. WAGNER, 1950). Die heutige Verebnung ist folglich das Aufschüttungsfeld des aufgestauten Schwarzwasserbachs.

Der Schwarzwasserbach versinkt am Bergsturzriegel in mehreren Schwinden vollständig und ganzjährig (Fig. 2). Bereits während seiner Passage über die Verebnung verliert er diffus Wasser an den Untergrund. Aufgrund der influenten Verhältnisse versickert der Bach bei niedrigen Abflüssen schon gänzlich vor Erreichen des Bergsturz-

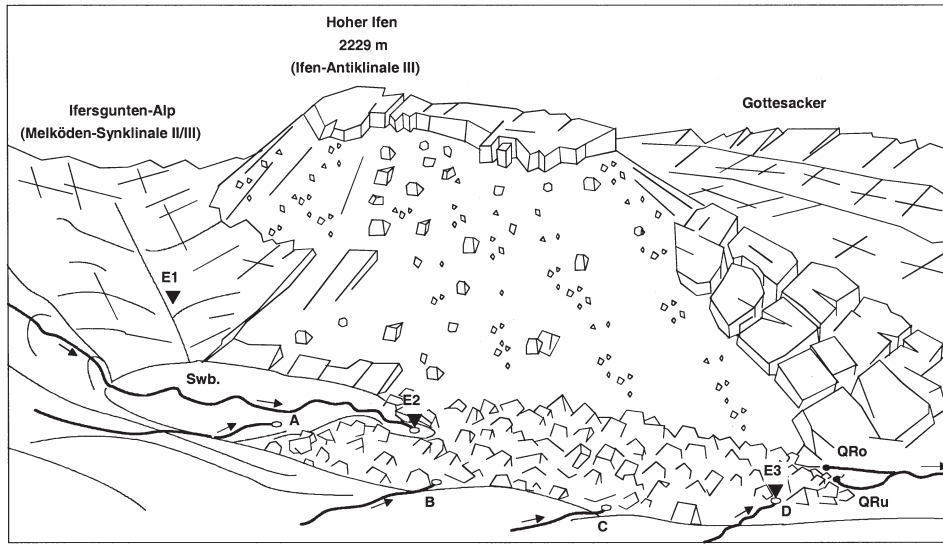

Fig. 2: Hoher Ifen und Bergsturzmasse im oberen Schwarzwassertal von SE mit Lage der Bäche A–D und Schwarzwasserbach (Swb.). Zusätzlich sind die Eingabestellen der Markierungsversuche (E1–E3) und die Resurgenzen QRo und QRu dargestellt.
South-easterly view of the Hoher Ifen mountain and the rockfall mass in the upper Schwarzwasser valley, with the location of the streams A–D and Schwarzwasserbach (Swb.). In addition tracer injection points (E1–E3) and the outlets QRo and QRu are indicated.

riegels. Während der Schneeschmelze oder nach starken Niederschlagsereignissen kann der Bergsturz das ankommende Wasser nicht fassen und es kommt zu einem Rückstau, so dass sich auf der Verebnungsfläche ein flacher See bildet. Die Bergsturzmasse hat also bis heute ihre Funktion beibehalten, Hochwasserwellen zeitlich zu verzögern und die Abflussspitzen abzudämpfen. Der See entwässert über mehrere Schlucklöcher, wobei sich kräftige Strudel bilden. Diese Beobachtung belegt, dass es sich hierbei nicht um eine Grundwasserblänke handelt, sondern dass unter dem See eine ungesättigte Zone vorhanden sein muss. Zusätzlich zum Schwarzwasserbach treffen vier weitere Bäche, die das Flyschgebiet der südlichen Talseite entwässern (Bäche A–D in Fig. 2), auf die Bergsturzmasse und versinken dort ebenfalls vollständig und ganzjährig. Am talwärtigen Ende der Bergsturzmasse treten schüttungsstarke Schuttquellen aus. Diese stellen in erster Annahme den Wiederaustritt der versinkenden Bäche dar (G. WAGNER, 1950), weshalb sie im Folgenden als Resurgenzen bezeichnet werden.

Im weiteren Talverlauf schneidet der Schwarzwasserbach den unter den Flysch abtauchenden helvetischen Schrattenkalk. Durch Markierungsversuche konnte gezeigt werden, dass hier der Schrattenkalk einen zusammenhängenden Karstgrundwasserleiter bildet, der alle vom Gottesackerplateau und der Ifersgunten-Alp abfließenden Wässer sammelt und einer Estavelle (QE in Fig. 1) und vier Karstquellen im unteren Schwarzwassertal (QA, QB, QK, QS) sowie einer Grundquelle (QG) in der Breitach zuführt (N. GOLDSCHEIDER & H. HÖTZL, 2000).

3. Hydrogeologische Untersuchungen

3.1. Abflussbilanz und Speicherverhalten

Die Bergsturzmasse erfährt ihre Alimentation hauptsächlich aus den in sie versinkenden Bächen, deren Einzugsgebiete um ein Vielfaches größer sind als die Fläche der Bergsturzmasse. Die flächenhaft-diffuse Grundwasserneubildung durch Infiltration von Regenwasser sowie der Zufluss aus angrenzenden Schuttfächern sind infolge der hohen Durchlässigkeit des Blockwerks auf die Niederschlagsereignisse selbst beschränkt. Der Schwarzwasserbach ist aufgrund der gering durchlässigen Gesteine und der steilen Topographie in seinem Einzugsgebiet sehr starken Abflussschwankungen von wenigen 10er l/s bis zu mehreren 1000 l/s ausgesetzt. Dagegen zeigen die vier anderen Bäche im Untersuchungszeitraum (August bis November 1997) ein konstanteres Abflussverhalten von insgesamt zwischen 32 und 350 l/s.

Die Quellgruppen am unteren Ende der Bergsturzmasse sind in Abhängigkeit vom jeweiligen Wasserstand aktiv: Die untere Resurgenz (QRu) besteht aus mehreren perennierenden Austritten und schüttet insgesamt zwischen 6 und 70 l/s. Die obere Resurgenz (QRo) ist intermittierend. Bei Hochwasser wurde eine Schüttung von 2500 l/s beobachtet, bei Niedrigwasser fällt sie trocken, oft schon wenige Tage nach einer Hochwasserwelle. Von QRo ausgehend führt eine Erosionsrinne etwa 70 m weit in die Bergsturzmasse hinein. Diese liegt meist trocken, dient aber als Hochwasserüberlauf, wobei der höchste Austrittspunkt nur bei extremen Niederschlagsereignissen aktiv ist.

Auffällig ist, dass die Abflussmenge des Schwarzwasserbachs unterhalb der Bergsturzmasse meist deutlich geringer als oberhalb ist. Ein Teil des versickerten Wassers wird offensichtlich unterirdisch abgeführt, was auf eine hydraulische Anbindung an den unterlagernden, verkarsteten Schrattenkalk schließen lässt. Um diese erste Ein-

schätzung zu quantifizieren, wurde für mittlere hydrologische Bedingungen (Mittelwasser) eine Abflussbilanz der Bergsturzmasse aufgestellt (Fig. 3). In die Bilanz gehen die Abflussmengen der fünf in die Bergsturzmasse versinkenden Bäche ein. Direkt an Niederschlagsereignisse gebundene Anteile – wie die Direktinfiltration – können für die Betrachtung bei Mittelwasser vernachlässigt werden. Als Abflüsse müssen für die Bergsturzmasse die Quellschüttungen an QRo und QRu sowie ein unterirdischer Karstabfluss in Betracht gezogen werden.

Für die Bilanzierung wurden die oberirdischen Zu- und Abflüsse durch Mengenmessungen nach der Salzverdünnungsmethode bestimmt. Der Zufluss für diese Einzelmessungen beträgt 102 l/s durch den Schwarzwasserbach (Swb.) und 62 l/s durch die Bäche A–D. Insgesamt werden demnach bei Mittelwasser an der Bergsturzmasse 164 l/s umgesetzt.

An den Resurgenzen treten demgegenüber 60 l/s an QRo und 14 l/s an QRu, also insgesamt nur 74 l/s wieder aus. Da aber für stationäre Bedingungen und damit vernachlässigbare Zwischenspeicherung für ein hydrographisches Modell Zufluss gleich Abfluss ist, ergibt sich für Mittelwasser ein oberirdisches Abflussdefizit von 90 l/s. Diese 90 l/s – oder 55 % der Zuflüsse – werden folglich innerhalb der Bergsturzmasse dem unterlagernden Karstgrundwasserleiter zugeführt.

Weitere Abflussmessungen bei Niedrigwasser bis erhöhtem Mittelwasser haben gezeigt, dass die absolute Differenz zwischen der Versinkungsrate und den Quellschüttungen, also die vertikale Zusickerung in den Karst, nur geringe Schwankungen aufweist (Fig. 4).

Die obere Resurgenz ist starken Schüttungsschwankungen unterworfen, die mit der Wasserführung des am Bersturzriegel versinkenden Schwarzwasserbachs korrelierbar sind. So äußert sich etwa die Ankunft einer Hochwasserwelle am Bergsturzriegel in einem um einige Stunden zeitverzögerten, rasanten Anstieg der Quellschüttung. Für QRo wurde eine Schüttungsganglinie erstellt und daraus der Auslaufkoeffizient nach E. MAILLET (1905) bestimmt. Dabei konnte zwischen einem Direktabfluss unmittelbar nach dem Schüttungsmaximum und einem Basisabfluss unterschieden werden. Da

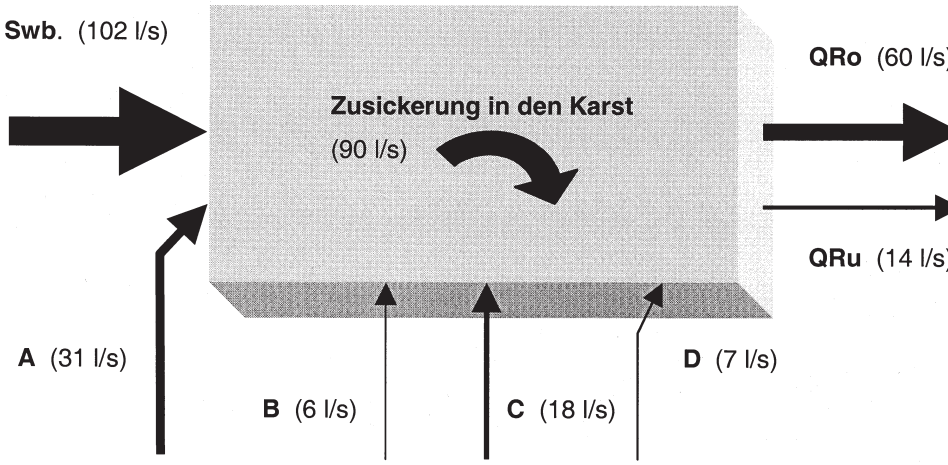

Fig. 3: Schematische Aufsicht auf die Bergsturzmasse mit Abflussbilanz bei mittleren hydrologischen Bedingungen.
Schematic map of the rockfall mass together with water balance at mean hydrological conditions.

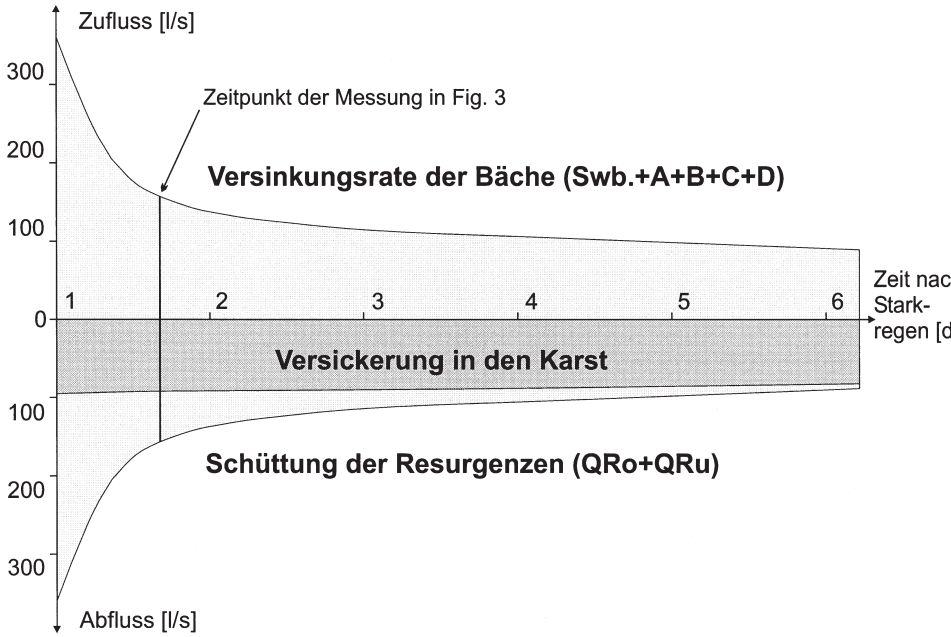

Fig. 4: Darstellung der Abflussbilanz zwischen den Bachversinkungen und den Resurgenzen. Die Differenz ergibt die Zusickerungsrate in den unterlagernden Karst.
Diagram of water balance dynamics between infiltrating streams and stream reappearances. The difference between both values represents the seepage to the underlying karst aquifer.

die Bergsturzmasse jedoch einerseits bedeutende Zuflüsse durch den versinkenden Schwarzwasserbach erhält und andererseits ein Teil des Wassers in den Karst sickert repräsentiert die Leerlaufkurve nicht allein das Speicherverhalten der Bergsturzmasse, sondern des gesamten Systems.

Für den Direktabfluss wurde ein Auslaufkoeffizient von 3,4 d^{-1}, für den Basisabfluss von 1,3 d^{-1} bestimmt. Solch hohe Werte weisen auf schnelle und weitlumige Entwässerungswege und eine geringe Speicherung im Untergrund hin. Sie äußern sich darin, dass das Grundwasserreservoir von QRo bereits vier Tage nach dem Schüttungsmaximum von 2500 l/s erschöpft war. Bei mittleren hydrologischen Verhältnissen stehen der Quelle trotz einer Schüttung von 60 l/s nur noch etwa 4000 m^3 aus dem Wasserspeicher zur Verfügung. Bei Niedrigwasser ist dieser Grundwasservorrat bereits aufgebraucht und QRo liegt trocken. An den Karstquellen im unteren Schwarzwassertal wurden im Vergleich dazu Auslaufkoeffizienten für den Direktabfluss von etwa 2,0 d^{-1} und für den Basisabfluss zwischen 0,1 d^{-1} und 0,6 d^{-1} ermittelt (M. SINREICH, 1998).

3.2. Hydrochemie

Die Quellwässer der beiden Resurgenzen weisen starke tageszeitliche Schwankungen der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit auf, die den Einfluss der versinkenden Oberflächengewässer erkennen lassen. Dabei besitzt QRu im Untersuchungszeitraum eine geringere mittlere Temperatur als QRo. Dies kann daran liegen, dass die Bäche, die am Südrand der Bergsturzmasse versinken und an QRu wieder austreten, aus großer

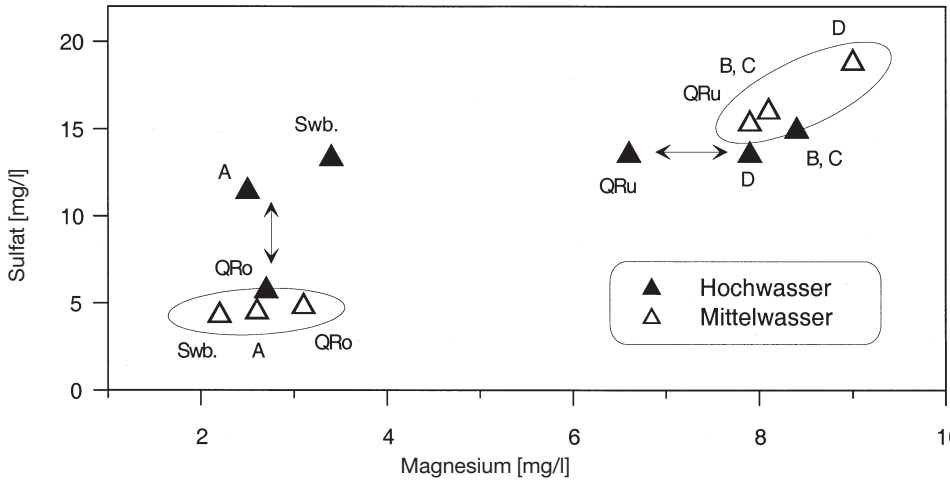

Fig. 5: Konzentrationen an Magnesium und Sulfat in den untersuchten Wässern bei Mittelwasser und bei Hochwasser.
Magnesium-sulfate correlation for the sampled water at mean flow conditions and flood events.

Höhe über nordexponierte Hänge abfließen, während der Schwarzwasserbach, der in QRo wieder zutage tritt, vor seiner Versinkung in den Bergsturzriegel über die besonnte Verebnung fließt. An QRu wurde außerdem stets eine deutlich höhere elektrische Leitfähigkeit gemessen als an QRo, wobei die Schwankungsbreite an QRo weit über der von QRu liegt.

Die beiden Quellen gehören dem Typus normal erdalkalischer, überwiegend hydrogenkarbonatischer Wässer an, wobei QRu einen höheren Gehalt an Magnesium und Sulfat aufweist. Um Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Einzugsgebiete von QRo und QRu ziehen zu können, wurden Magnesium und Sulfat als natürliche Tracer verwendet, da diese Inhaltsstoffe Indikatoren für Wässer aus dem Flyschgebiet sind (Fig. 5).

Bei mittleren bis niedrigen Abflussverhältnissen weisen QRo, der Schwarzwasserbach und Bach A sehr ähnliche, relativ geringe Gehalte an Magnesium und Sulfat auf. Dies deutet darauf hin, dass QRo einen Wiederaustritt dieser beiden Zuflüsse darstellt. Dagegen sind QRu und die Bäche B–D durch relativ hohe, ebenfalls sehr ähnliche Konzentrationen gekennzeichnet. QRu kann also als Wiederaustritt dieser drei Bäche angesehen werden.

Für Hochwasserbedingungen kommt es zu einer Auflockerung dieser hydrochemischen Gruppierung: QRu rückt im Konzentrationsdiagramm in Richtung Schwarzwasserbach, und Bach A scheint nun also eine Zumischung von diesen Bächen zu erhalten. QRo weist dagegen bei Hochwasser einen deutlich geringeren Gehalt an Sulfat als alle versinkenden Bäche auf, muss also eine Zumischung durch gering mineralisierte Komponenten erfahren, vermutlich durch direkt in die Bergsturzmasse infliltrierenden Niederschlag oder durch lateral zufließende Wässer vom Südhang des Hochifen.

3.3. Markierungsversuche

Zur Charakterisierung der unterirdischen Abstromverhältnisse in der Bergsturzmasse und der hydraulischen Zusammenhänge zwischen Flyschgebiet, Bergsturz und

Karstgrundwasserleiter wurden ein kombinierter Farbtracerversuch und ein Salzungsversuch durchgeführt.

Am 11. 09. 1997 wurden talaufwärts der Bergsturzmasse in eine Schwinde im anstehenden Schrattenkalk 5,8 kg Eosin eingespeist (E1 in Fig. 2). Einen Tag später diente die Versinkung des Schwarzwasserbachs am Bergsturzriegel als Eingabestelle für 3,0 kg Sulforhodamin B (E2). An den Resurgenzen und den Karstquellen im unteren Schwarzwassertal wurden regelmäßig Wasserproben entnommen, die spektralfluorimetrisch auf die eingesetzten Tracer untersucht wurden.

Zur Zeit der Eingaben herrschten niedrige bis mittlere Abflussbedingungen. In der Nacht vom 12. auf den 13. 09. 1997 setzten jedoch ergiebige Regenfälle ein (34,2 mm), die zu einem starken Anstieg der Quellschüttungen führten. In den folgenden Wochen blieben Niederschläge weitgehend aus, so dass sich wieder niedrige Abflüsse einstellten. Aufgrund der extrem instationären hydrologischen Verhältnisse war eine hinreichend genaue Erfassung der Schüttungsganglinien und damit die Berechnung des Wiedererhalts der Tracer nicht möglich.

Acht Stunden nach der Einspeisung konnte Sulforhodamin B erstmals an QRo nachgewiesen werden (Fig. 6). Das Maximum von 362 µg/l wurde bereits nach 11 h erreicht. Für die unterirdische Fließstrecke von etwa 900 m ergibt sich somit eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 113 m/h und eine dominierende von 81 m/h (Tab. 1). Beide Werte repräsentieren niedrige Mittelwasserbedingungen, da sich die Niederschläge erst etwa 30 h nach der Eingabe auf die Quellschüttung auswirkten. Die Durchgangskurve besitzt ein zwar niedriges, aber langanhaltendes Tailing, so dass noch nach über zwei Monaten Sulforhodamin B an QRo festgestellt wurde.

An QRu konnte zunächst kein Sulforhodamin B nachgewiesen werden. Erst mit Ankunft der Hochwasserwelle an den Resurgenzen setzte ein vorübergehender Tra-

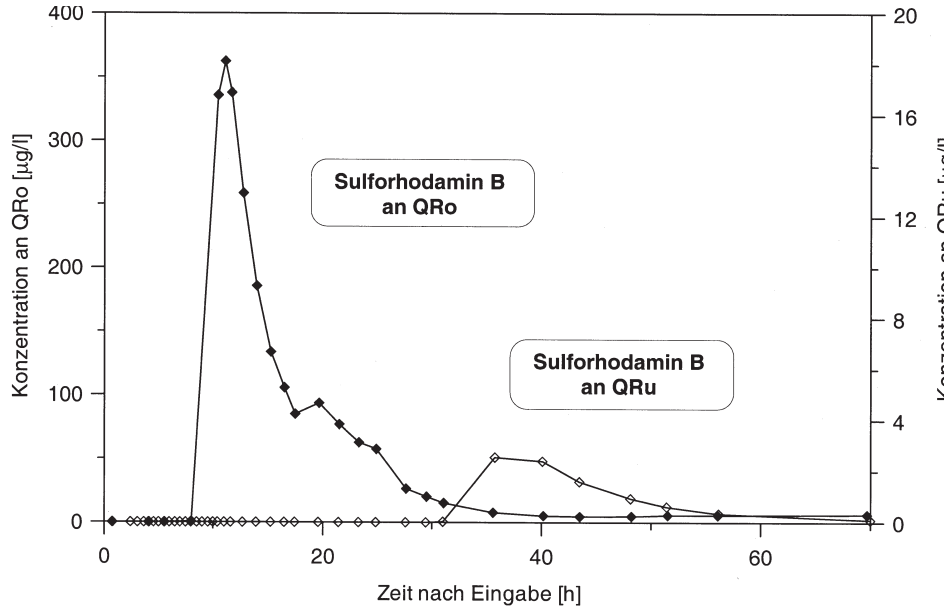

Fig. 6: Durchgangskurven von Sulforhodamin B an den Resurgenzen QRo und QRu.
Breakthrough curves of Sulforhodamine B measured at the outlets QRo and QRu.

Tab. 1: Kennwerte der registrierten Tracerdurchgänge an den Karstquellen im unteren Schwarzwassertal (Schrattenkalk) und an den Resurgenzen (Bergsturzmasse). (x = Entfernung zur Eingabestelle, t_{erst} = Zeitpunkt des ersten Tracernachweises, t_{dom} = Zeitpunkt des Konzentrationsmaximums, v_{max} = maximale Abstandsgeschwindigkeit, v_{dom} = dominierende Abstandsgeschwindigkeit).
Parameters of the breakthrough curves for the karst springs in the lower Schwarzwasser valley (Schrattenkalk) and at the stream reappearances (rockfall mass). (x = distance to the injection point, t_{erst} = time of the first tracer detection, t_{dom} = time of the concentration maximum, v_{max} = maximal groundwater velocity, v_{dom} = dominant groundwater velocity).

markierter Grundwasserleiter	eingesetzter Tracer	x [km]	t_{erst} [h]	t_{dom} [h]	v_{max} [m/h]	v_{dom} [m/h]
Schrattenkalk	Sulforhodamin B	3,8–6,1	34–49	38–59	130	111
	Eosin	5,1–7,4	59–76	75–111	98	66
Bergsturzmasse	Sulforhodamin B	0,9	8,0	11,1	113	81
	NaCl	0,17	1,4	2,7	120	65

cerdurchgang ein, allerdings mit wesentlich niedrigeren Konzentrationen an QRo (maximal 2,56 µg/l im Vergleich zu 7,79 µg/l an QRo zur selben Zeit). QRu erhält demnach im Gegensatz zu QRo nur bei Hochwasser Zufluss aus dem versinkenden Schwarzwasserbach.

Ein Teil des eingegebenen Sulforhodamin B durchsickerte die Bergsturzmasse und wurde nach 34–49 h an den Karstquellen des unteren Schwarzwassertals erstmals nachgewiesen. Damit ergibt sich eine gemittelte Abstandsgeschwindigkeit im Schrattenkalk von maximal 130 m/h und dominant 111 m/h (Tab. 1). Eine signifikante Verzögerung durch den Transport innerhalb der Bergsturzmasse ist nicht zu erkennen.

Durch die Markierung mit Eosin sollte überprüft werden, ob der verkarstete Schrattenkalk talaufwärts der Bergsturzmasse in hydraulischer Verbindung mit dem Karstgrundwasserleiter im unteren Schwarzwassertal steht. Der Tracer erreichte nach 59–76 h die dortigen Karstquellen. Daraus resultiert eine gemittelte maximale Abstandsgeschwindigkeit von 98 m/h (Tab. 1). Bei anderen Markierungsversuchen im Schwarzwassertal wurden 100–160 m/h gemessen (N. GOLDSCHEIDER & H. HÖTZL, 2000).

In Folge der Hochwasserwelle konnten an den Resurgenzen in drei Wasserproben Spuren von Eosin im Bereich der analytischen Nachweisgrenze festgestellt werden. Es scheint demnach nicht ausgeschlossen, dass bei hohen Abflüssen Karstwasser in die Bergsturzmasse aufsteigen kann.

Da QRu unter normalen hydrologischen Bedingungen keinen Zufluss vom Schwarzwasserbach erhält, muss die Quellgruppe ihr Wasser von den Bächen aus dem Flyschgebiet beziehen. Der am nächsten gelegene Bach D versinkt etwa 170 m talaufwärts von QRu in der Bergsturzmasse. Zur Überprüfung der hydraulischen Verbindung wurden dem Bach bei Niedrigwasser 2,5 kg NaCl zugegeben (E3). An QRu wurde an jedem einzelnen Quellaustritt der Gang der elektrischen Leitfähigkeit verfolgt (Fig. 7).

Der erste Wiederaustritt erfolgte nach 85 min, die maximale Konzentration erreichte QRu nach 160 min. Die sich daraus ergebende maximale und dominierende Abstandsgeschwindigkeit (120 m/h und 65 m/h) ist mit den Durchflussgeschwindigkeiten des Schwarzwasserbachs durch die Bergsturzmasse vergleichbar (Tab. 1). Für die einzelnen Quellaustritte lassen die Ganglinien der elektrischen Leitfähigkeit eine Differenzierung erkennen: Je näher sich der Austritt an der Tiefenlinie des Tals befindet,

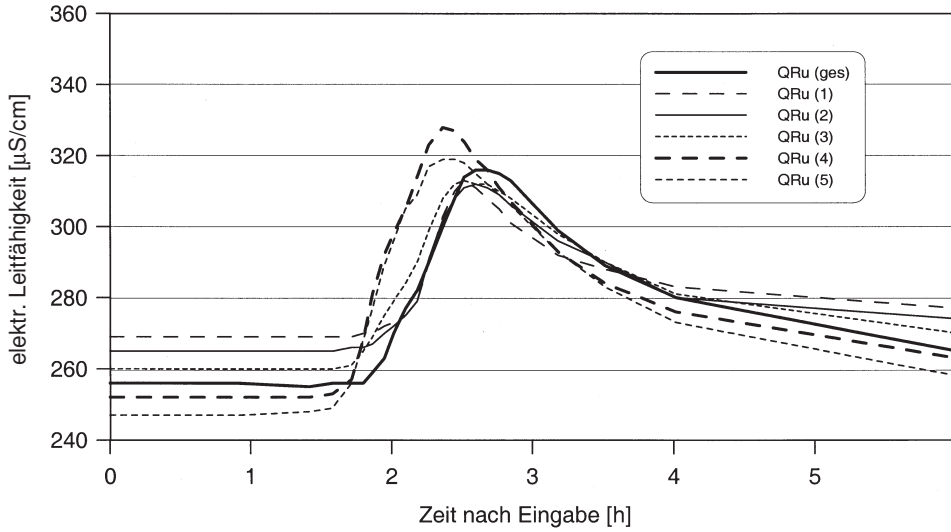

Fig. 7: Ganglinien der elektrischen Leitfähigkeit an QRu sowie für die einzelnen Quellaustritte (1–5 von S nach N in Richtung der Taltiefenlinie).
Electrical conductivity frequency curves for QRu and for the five outlets (1–5 from S to N, to the center of the valley).

desto geringer ist die Grundleitfähigkeit, desto größer die Fließgeschwindigkeit, desto höher das Durchgangsmaximum und desto geringer die Dispersion. Vermutlich existieren im zentralen Teil der Bergsturzmasse bevorzugte Fließbereiche höherer Durchlässigkeit, über die das infiltrierte Wasser schneller abfließen kann.

4. Hydrogeologische Modellvorstellung

Die Bergsturzmasse stellt ein Bindeglied zwischen Oberflächenabfluss und Karstentwässerung dar (Fig. 8). Der Schwarzwasserbach und die Bäche aus dem Flyschgebiet versinken an der Bergsturzmasse ganzjährig und vollständig. Ein Teil des Wassers tritt an den Resurgenzen wieder aus, ein anderer Teil wird dem Karstgrundwasserleiter des Schrattenkalks zugeführt, der sich vom oberen Schwarzwassertal unter der Bergsturzmasse bis zum unteren Talabschnitt hindurchzieht, und dort von der Estavelle und den Karstquellen entwässert wird.

Während die Versinkungsrate am Bergsturz und die Schüttung der Resurgenzen starken Schwankungen unterworfen sind, beträgt die Zusickerung aus der Bergsturzmasse in den Karst relativ konstant etwa 80–90 l/s. Der nicht versickerte Anteil tritt an den Resurgenzen wieder aus und bildet den weiteren Verlauf des Schwarzwasserbachs. Bei Hochwasser verliert die Bergsturzmasse nur einen prozentual kleinen Anteil ihres Wassers an den Karst; bei extremem Hochwasser kann es eventuell zu einem Aufstieg von Karstwasser in die Bergsturzmasse kommen. Bei Niedrigwasser fällt die Resurgenz des Schwarzwasserbachs trocken und das gesamte obere Schwarzwassertal wird ab der Bergsturzmasse unterirdisch über den Schrattenkalk entwässert. Offensichtlich besteht zwischen Bergsturzmaterial und Schrattenkalk eine sehr gute

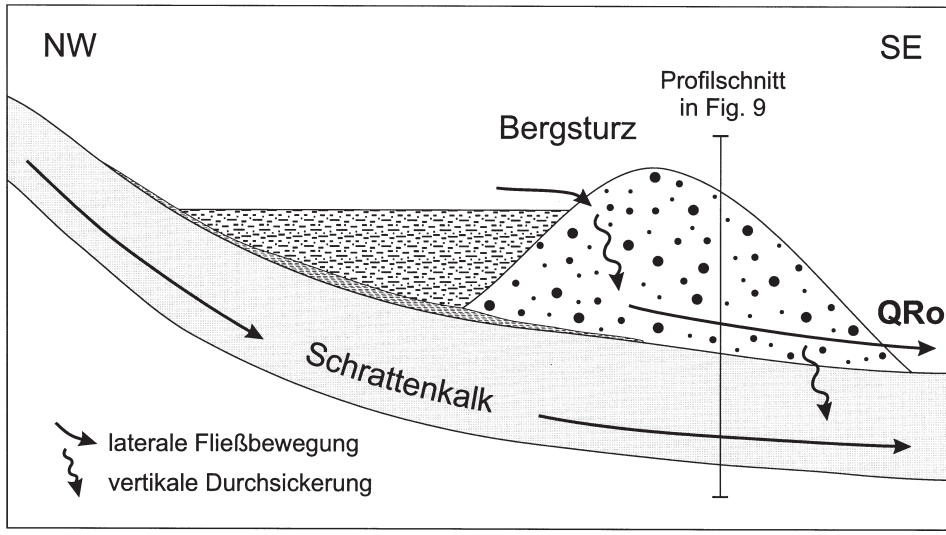

Fig. 8: Schematisierter Profilschnitt entlang des oberen Schwarzwassertals mit nachgewiesenen Fließverbindungen bei Mittelwasser.
Schematic cross-section along the upper Schwarzwasser valley. Lines indicate flow paths during mean flow conditions.

hydraulische Anbindung, was vermuten lässt, dass abdichtendes Moränenmaterial, welches ursprünglich in weiten Teilen des Tals abgelagert wurde, hier teilweise – möglicherweise durch den Bergsturzabgang – entfernt wurde.

Die beiden Resurgenzen, welche die Bergsturzmasse entwässern, besitzen bei niedrigen und mittleren Abflüssen getrennte Einzugsgebiete. Während QRo der Wiederaustritt der an der Verebnung versinkenden Bäche ist (Schwarzwasserbach und Bach A), wird QRu von drei anderen auf die Bergsturzmasse treffenden Bächen gespeist (Bäche B–D). Zwischen beiden Quellen besteht demnach eine unterirdische hydraulische Barriere (Fig. 9). Bei Hochwasser kann diese Barriere überflossen werden. Dann überschneiden sich die Einzugsgebiete von QRo und QRu mit einer Verschiebung zu Gunsten von QRu. Während der Hochwasserwelle im Verlauf des Tracerversuchs bestand das Quellwasser von QRu kurzzeitig zu einem Drittel aus Wasser des Schwarzwasserbachs.

Innerhalb der Bergsturzmasse sind bevorzugte Hauptfließwege ausgebildet. Solche Wasserwegsamkeiten in abgegangenen Massenbewegungen können durch sekundäre Umlagerungsprozesse hervorgerufen werden (G. ABELE, 1974). Dabei kann es einerseits zu Abdichtungserscheinungen, andererseits zu Auswaschungen des Lockergesteins kommen. Vermutlich hat sich im liegenden Teil der Bergsturzmasse Feinmaterial abgesetzt, welches dann im Laufe der Zeit durch die infiltrierten Wässer teilweise freigespült wurde.

Auf diese Weise ist auch die Herausbildung einer Barriere und damit die hydraulische Zweiteilung des Grundwasserleiters zu erklären. Verkarstung hat dabei vermutlich keine nennenswerte Rolle gespielt.

Die Abstandsgeschwindigkeiten sind mit bis zu 120 m/h für einen Porengrundwasserleiter außergewöhnlich hoch. Neben der sehr guten Durchlässigkeit der freigespülten Hauptfließwege ist dies auch auf das hohe Gefälle von beinahe 10 % zwischen

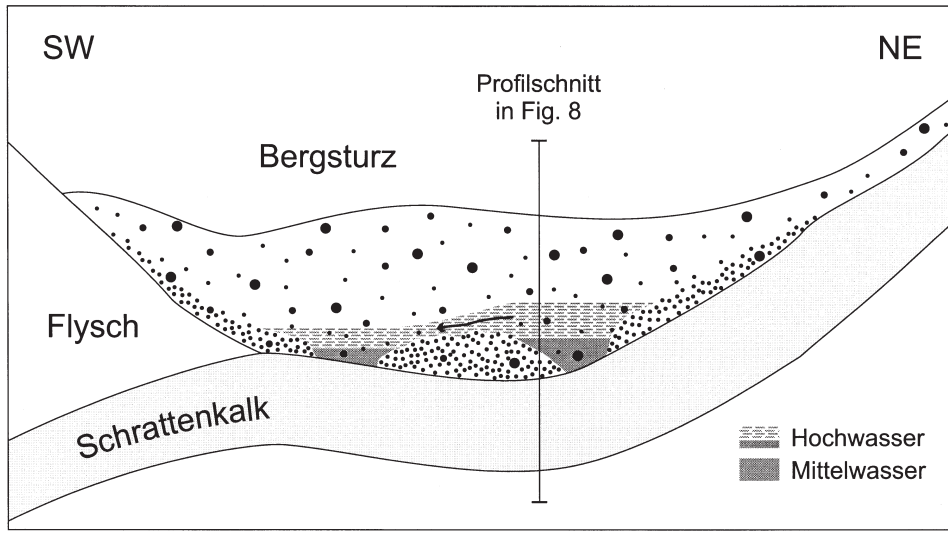

Fig. 9: Schematisierter Profilschnitt der Bergsturzmasse quer zum Schwarzwassertal mit hydrogeologischem Modell einer hydraulischen Barriere, die nur bei Hochwasser überflossen werden kann.
Conceptual model across the valley, showing the presence of a hydraulic barrier within the rockfall mass. The hydraulic barrier can be overflowed during flood events only.

Versinkungsstellen und Resurgenzen zurückzuführen. Da die Grundwasseroberfläche im Bereich der Versinkungsstellen aber stets unterhalb der Geländeoberfläche liegt, ist der hydraulisch wirksame Gradient jedoch kleiner als der topographische.

Obwohl die Bergsturzmasse durch den zeitweisen Rückstau des Schwarzwasserbachs die Verzögerung und Dämpfung von Hochwasserwellen bewirkt, zeichnet sie sich durch ein geringes internes Rückhalte- und Speichervermögen aus. Dies begünstigt ein schnelles Ansprechen auf wechselnde hydrologische Verhältnisse, was sich in hohen Schüttungsschwankungen der Quellen und starken Schwankungen des Grundwasserspiegels äußert.

Eine gewisse Speicherfähigkeit hat sich während des Markierungsversuches gezeigt, als noch Monate nach der Tracereingabe Farbstoff im Quellwasser der Resurgenz gefunden wurde. Offenbar wurde durch die Hochwasserwelle kurzzeitig markiertes Wasser in die sehr feinkörnige Matrix des Sedimentkörpers gedrückt. Dieses zwischengespeicherte Wasser sickerte dann nur langsam aus den Poren in die weitlumigen Abflusswege zurück. Allerdings könnte dieser Effekt auch eine Folge der relativ hohen Sorptivität des verwendeten Tracers sein.

Obwohl die Bergsturzmasse aus Lockergestein besteht und daher als Porengrundwasserleiter anzusprechen ist, zeigt sie typische hydrologische Merkmale eines Karstgrundwasserleiters, von der konzentrierten Grundwasserneubildung über das Fließ- und Speicherverhalten bis hin zur Schüttungscharakteristik der Quellen (Tab. 2) auch wenn die wirksamen Prozesse – chemische Lösung im Karst und mechanische Freispülung im Bergsturz – selbstverständlich unterschiedlich sind. Ob sich jedoch in der unterschiedlichen topographischen Höhe der Quellen – analog zu einem Karstsystem – eine zeitliche Entwicklung widerspiegelt, also eine Tieferlegung der unterirdischen Entwässerung durch Freispülung erfolgte, ist nicht geklärt.

Tab. 2: Vereinfachte Darstellung der charakteristischen hydrogeologischen Merkmale der Bergsturzmasse im Vergleich zu typischen Karst- und Porengrundwasserleitern.
Simplified description of the hydrogeological characteristics of the rockfall mass compared to typical karstic and porous aquifers.

Merkmal	typischer Karst-grundwasserleiter	Bergsturzmasse im Schwarzwassertal	typischer Poren-grundwasserleiter
Gestein	Festgestein	Lockergestein	Lockergestein
Aufbau	anisotrop, heterogen	anisotrop, heterogen	± isotrop, ± homogen
Entwässerung	unterirdisch	unterirdisch	unter- und oberirdisch
Grundwasserneubildung	1. flächenhaft-diffus 2. konzentriert in Schwinden	1. flächenhaft-diffus 2. konzentriert in Schwinden	nur flächenhaft-diffus
primäre Hohlräume	Klüfte (teils auch Poren)	Poren	Poren
sekundäre Hohlräume	korrosiv erweitertes Karstnetzwerk	freigespülte Hauptfließwege	–
wirksame Prozesse	chemische Lösung (Verkarstung!)	mech. Freispülen; evtl. auch Kalklösung?	–
Fließgeschwindigkeit	hoch (10–1000 m/h)	hoch (≈ 100 m/h)	niedrig (< 1 m/h)
Speicherfähigkeit	gering	gering	hoch
Quellschüttung	hoch (m^3/s)	hoch (m^3/s)	gering (l/s)
Schüttungsschwankung	hoch (intermittierend)	hoch (tlw. intermittierend)	gering (perennierend)
Trübstoffe im Quellwasser	häufig	häufig	selten
hydraulische Reaktion auf hydrologische Ereignisse	schnell (Stunden bis Tage)	schnell (Stunden bis Tage)	langsam (Tage bis Monate)
Schwankung des Grundwasserspiegels	stark (m–100 m)	stark (viele m)	gering (cm–dm)

Zusammenfassung

Massenbewegungen können die innere Struktur und damit die hydraulischen Eigenschaften eines Gesteinsverbandes maßgeblich verändern. Im vorliegenden Fall wurde eine Bergsturzmasse in einem alpinen Karstgebiet Österreichs (Schwarzwassertal, Vorarlberg) mit Hilfe von Abflussmessungen, hydrochemischen Analysen und Markierungsversuchen hydrogeologisch untersucht.

Das Grundwasser der Bergsturzmasse wird hauptsächlich von versinkenden Bächen gebildet, während die Entwässerung über zwei Resurgenzen und unterirdisch über den unterlagernden Karst erfolgt. Die Bergsturzmasse selbst ist durch eine interne Barriere hydraulisch zweigeteilt, welche nur im Zuge von starken Hochwasserereignissen kurzfristig überflossen werden kann. Zudem zeichnet sich die Bergsturzmasse durch sehr hohe Abstandsgeschwindigkeiten entlang diskreter Fließwege und ein geringes Spei-

chervermögen aus. Insgesamt entspricht ihr hydraulischer Charakter nicht einem typischen Porengrundwasserleiter, sondern ähnelt eher einem typischen Karstgrundwasserleiter. Die Ursachen dafür werden in sekundären Umlagerungsprozessen gesehen.

Literatur

ABELE, G. (1974): Bergstürze in den Alpen – ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen.– Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, **25**, 165 S., München.

DIKAU, R., D. BRUNSDEN, L. SCHROTT & M. L. IBSEN (1996): Landslide recognition.– 251 S., Chichester, England (J. Wiley & Sons).

FORD, D. & D. W. WILLIAMS (1989): Karst Geomorphology and Hydrology.– 601 S., London/Boston/Sydney/Wellington (Unwin Hyman).

GOLDSCHEIDER, N. (1997): Hydrogeologische Untersuchungen im alpinen Karstgebiet Gottesacker und Schwarzwassertal (Allgäu/Vorarlberg).– Unveröff. Diplomarbeit, Univ. Karlsruhe, 128 S., Karlsruhe.

GOLDSCHEIDER, N. (2002): Hydrogeology and vulnerability of karst systems – examples from the Northern Alps and Swabian Alb.– Diss., Univ. Karlsruhe, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften, 236 S., Karlsruhe, [http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/2002/bio-geo/3/3.pdf].

GOLDSCHEIDER, N. & H. HÖTZL (2000): Tektonik und Karstentwässerung.– Karst & Höhle, **2000/2001**: Hochifen und Gottesacker, 51–82, Verband der deutschen Höhlen- und Karstforscher e. V., München.

HÖTZL, H. (1992): Talzuschübe und Felsgleitungen.– In: KÄSS, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik.– Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. **9**, 407–418, Stuttgart (Bornträger).

HÖTZL, H., M. MOSER, B. REICHERT & K. RENTSCHLER (1994): Hydrogeologische Markierungsversuche in Massenbewegungen (Reppwandgleitung, Kärnten und Stubnerkogel, Salzburg).– Beiträge z. Hydrogeologie, **45**, 69–92, Graz.

MAILLET, E. (1905): Mécanique et physique du globe. Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale.– 218 S., Paris (A. Hermann).

MOSER, M. (1997): Zur Prognose von Massenbewegungen.– Eclogae geol. Helv., **90**, 381–391, Basel.

MOSER, M. & J. KIEFER (1988): Die hydrogeologischen Verhältnisse und ihre Beziehungen zur Kinematik im Bereich der Talzuschubsmasse Gradenbach/Kärnten.– Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **39**, 95–115, Graz.

MOSER, M. & S. WEIDNER (1998): Die Auswirkungen von Talzuschüben auf die alpine Umwelt.– N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **208**, 531–548, Stuttgart.

RAMSPACHER, P., A. STEIDL & E. STROBL (2000): Hydrogeologische Untersuchungen im Raum Kaponig – Dösen im Rahmen der Errichtung des Kaponig Eisenbahntunnels (Kärnten, Österreich).– Beiträge z. Hydrogeologie, **51**, 111–168, Graz.

SCHMIDT-THOMÉ, P. (1960): Zur Geologie und Morphologie des Ifengebirgsstockes (Allgäu).– Erdkunde, **14**, 181–195, Bonn.

SINREICH, M. (1998): Hydrogeologische Untersuchungen im oberen Schwarzwassertal (Vorarlberg) – Wechselwirkungen zwischen Bergsturzmasse, Karstgrundwasserleiter und Flyschgebiet.– Unveröff. Diplomarbeit, Univ. Karlsruhe, 118 S., Karlsruhe.

TURNER, A. K. & R. L. SCHUSTER (1996): Landslides, investigation and migration.– Transportation Research Board, Special Rept., **247**, 673 S., Washington D.C. (National Academy Press).

VÖLK, H. R. (2001): Geomorphologie des Kleinwalsertals und seiner Gebirgsumrahmung. Landschaftsformen zur Eiszeit und Nacheiszeit unter Einbeziehung der geologischen Verhältnisse.– Vorarlberger Naturschau, **10**, 7–96, Dornbirn (in Druck).

WAGNER, G. (1950): Rund um Hochifen und Gottesackergebiet.– 116 S., Öhringen (Verl. Hohenlohesche B.).

WYSSLING, G. (1986): Der frühkretazische Schelf in Vorarlberg und im Allgäu – Stratigraphie, Sedimentologie und Paläogeographie.– Jb. Geol. B.-Anst., **129** (1), 161–265, Wien.

ZACHER, W. (1973): Das Helvetikum zwischen Rhein und Iller (Allgäu/Vorarlberg).– Geotekt. Forsch., **44**, 1–74, Stuttgart.

Summary

Mass movements alter the internal structure of rock units and thereby changing the hydraulic characteristics. In the present case the hydrogeology of a rockfall mass in an alpine karst area in Schwarzwasser valley, Vorarlberg, Austria was studied using discharge measurements, hydrochemical analyses and performing tracer experiments.

The groundwater in the rockfall mass is mainly recharged by stream infiltration and discharged by two reappearing streams and by seepage to the underlying karst aquifer. The rockfall mass itself is subdivided by an internal hydraulic barrier which can be overflowed during flood events only. The hydrogeological behaviour of the mass is characterized by very high flow velocities along discrete flow paths, and by a low storage capacity. These characteristics which are more typical of a karstic rather than a granular aquifer are interpreted as the result of post-rockfall internal washing processes.

Stichwörter: Bergsturzmasse, Karstgrundwasserleiter, Markierungsversuche, Abfluss-Speicher-Modell, Alpen

Keywords: rockfall mass, karst aquifer, tracer experiments, discharge-storage model, Alps