

## Wasserfärbung in den Karstgebieten Bannalp und Griessental

Fidel Hendry, Beat Niederberger und Rolf Boller

In den Jahren 2002 bis 2005 ereigneten sich beim Bau des neuen Eisenbahntunnels von Grafenort nach Engelberg mehrere Wassereintritte. Die Herkunft des Wassers war aufgrund des geologischen Aufbaus der potentiellen Einzugsgebiete im Bereich der Bannalp und des Griessentals unklar. Durch eine gross angelegte Wasserfärbung im Jahr 2005 mit insgesamt fünf Farbstoffen konnte die HGU neue Erkenntnisse über die Entwässerung dieser Gebiete sowie die Wassereintritte im Tunnel gewinnen.

### Einleitung

Im Jahr 2001 wurde im Auftrag der zb Zentralbahn AG (ehemalige Luzern-Stans-Engelberg-Bahn LSE) mit dem Bau eines Eisenbahntunnels zwischen Grafenort und Engelberg begonnen. Der Tunnel führt nach weitgehend schlecht wasserdurchlässigem Gestein durch die verkarstete Quinten-Forma-

tion. Bereits beim ersten Kontakt mit dieser ereignete sich im August 2002 bei Tunnelmeter (Tm) 1700 ein Karstwassereintritt. Weitere folgten 2003 und 2005 bei Tm 1954 bzw. Tm 1956 samt Bildung der Tunnelklufthöhle. Diese neu entstandenen und sich durch die nachfolgende Erosion laufend vergrössernden Hohlräume wurden von der Höhlenforschergemeinschaft Unterwalden (HGU) im Auftrag der zb Zentralbahn AG vermessen und dokumentiert (Abb. 1).

Die HGU hatte sich bereits ein halbes Jahr vor dem ersten Wassereintritt mit der Gesamtprojektleitung in Verbindung gesetzt, um auf das in diesem Gebirgsbereich grosse Potential für karsthydrologische Phänomene hinzuweisen. Nach dem ersten Wassereintritt wurde die HGU, in Arbeitsgemeinschaft mit dem Geologiebüro magma AG, Zürich, mit der Überwachung der bekannten Karstquellen im Umfeld des Tunnels beauftragt. Dieses Mandat wurde bis Januar 2006 weitergeführt.

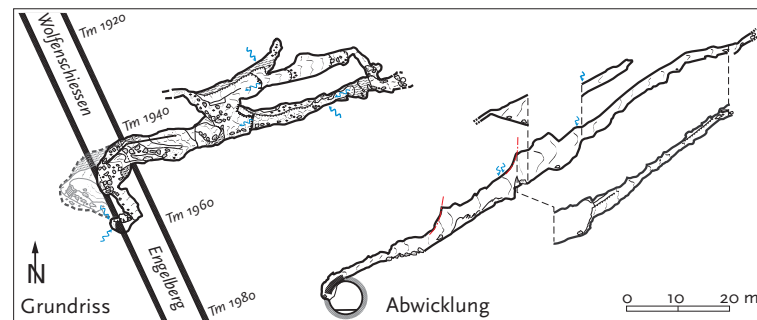


Abb. 1  
Grundriss und abgewickelter Seitenriss der Tunnelklufthöhle nach dem Originalplan 1:200 in der Version vom 21.10.2005. Vermessene Länge 162 m, Höhendifferenz +50 m. © HGU.

Abb. 2  
Blick vom Sätteligrat auf das Karstgebiet Oberfeldcharen im Vordergrund, im Hintergrund das Karstgebiet Griessental. Die beiden Karstgebiete sind topografisch durch den Grat Gross Sättelstock – Laucherestock – Ruchstock voneinander getrennt. (Foto: Fidel Hendry)



Abb. 2

Die Wassereintritte im Eisenbahntunnel und die Herkunft des Bergwassers lösten in der Öffentlichkeit zahlreiche Spekulationen und Befürchtungen aus. Das auffällige Schüttungsverhalten der Wassereintritte deutete schon bald auf Karstwasser hin. Im Oktober 1999 – also vor Beginn des Tunnelbaus – konnte HENDRY (2000) mittels einer Wasserfärbung bereits eine eindeutige Fliessverbindung vom Karstgebiet in der Bannalp (Wolfschliessen) zur nahe gelegenen Chaltibachquelle in Grafenort (Engelberg) nachweisen. Aufgrund des komplizierten Gebirgsaufbaus konnte jedoch nicht ohne eine weitere Wasserfärbung ausgeschlossen werden, dass das Wasser im Tunnel aus dem Karstgebiet im Griessental (Engelberg) stammt. Da die Bauherrschaft damals noch beabsichtigte, die Tunnelröhre vollständig abzudichten, erwartete sie keine negativen Auswirkungen auf den grossräumigen Wasserhaushalt und stand der Durchführung entsprechender Untersuchungen zurückhaltend gegenüber. Da die HGU nicht nur Höhlen erforscht,

sondern auch die im nicht begehbaren Teil des Karstes ablaufenden Prozesse und Zusammenhänge gesamtheitlich verstehen will, beschloss sie, die Wasserfärbung selber an die Hand zu nehmen. Die Wasserfärbung wurde mit Unterstützung des Instituts für Ingenieurgeologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich durchgeführt. Die ETH stellte ihr hydrogeologisches Labor für die aufwändigen Auswertungen zur Verfügung. Als Gegenleistung betreute die HGU die Diplomarbeit von HUCK (2006). Da die Laborarbeiten im Rahmen dieser Diplomarbeit jedoch nur teilweise durchgeführt werden konnten, wurden sie im Zusammenhang mit der Masterarbeit von BOLLER (2007) abgeschlossen.

### Das Untersuchungsgebiet und sein geologischer Aufbau

Das Untersuchungsgebiet besteht im Wesentlichen aus dem Bannalp- und dem Griessental-Karst sowie deren Randgebieten (Abb. 2 und 7). Es liegt zwischen Oberrickenbach und Engelberg

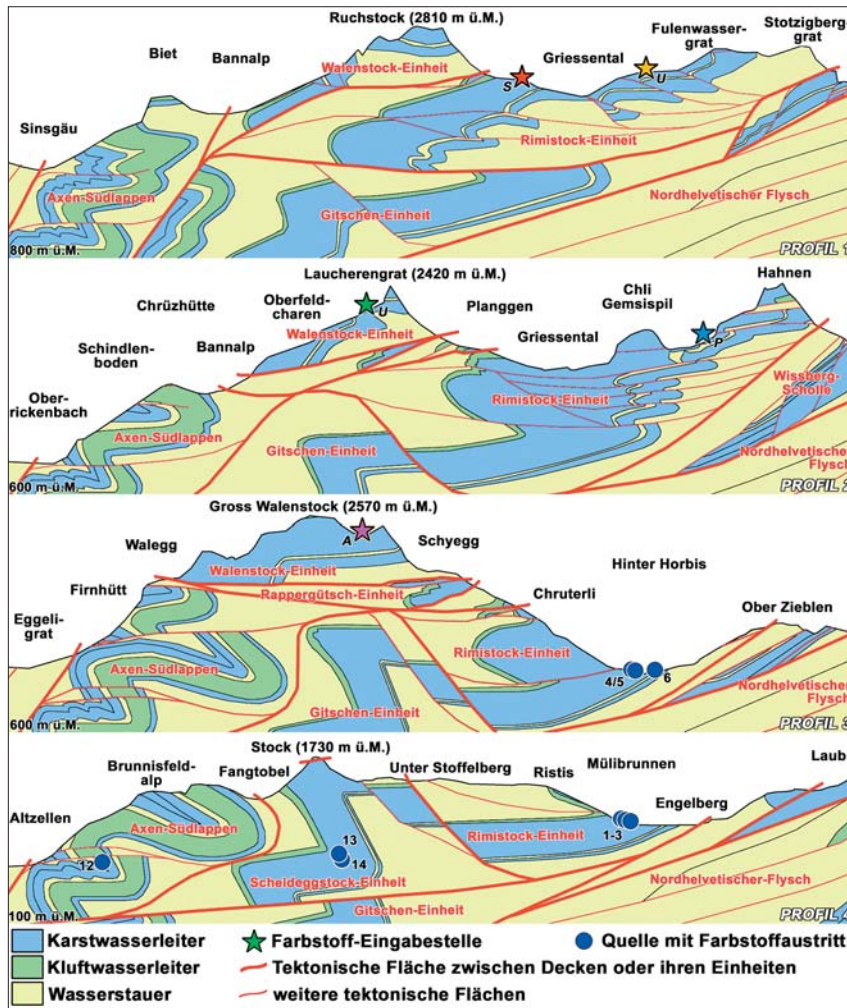


Abb. 3

und wird westlich durch das Aawasser begrenzt. Der östliche Rand wird durch die Bergkette Chaiserstuel–Ruchstock–Engelberger Rotstock–Wissigstock gebildet.

Tektonisch liegt das Untersuchungsgebiet im Bereich der Axen-Decke des helvetischen Überschiebungsgürtels. Lokal wird diese im Wesentlichen aus der Rimistock- und der Gitschen-Einheit sowie der bei der Alpenbildung darüber gescho-

benen Walenstock-Einheit gebildet (Abb. 3). Diese Einheiten bilden grossräumige, nordvergente liegende Antiklinalstrukturen, deren Faltenachsen mit 5 bis 10° gegen Westsüdwesten bis Südwesten einfallen. Die Scheideggstock-Einheit und der Axen-Südlappen sind der Rimistock-Einheit bzw. der Gitschen-Einheit nördlich vorgelagert. In der Walenstock-, der Rimistock-, der Gitschen- und der Scheideggstock-Einheit sind die Quinten-

Abb. 3

Die Tektonik des Untersuchungsgebiets nach MENKVELD (1995), eingefärbt nach ihrer Wasserdurchlässigkeit und die Lage der Farbstoff-Eingabestellen (Tab. 1) bzw. der Quellen (Tab. 2). Die Profilsuren sind in der Karte in Abb. 7 eingezeichnet.

Formation des Malm sehr gut, die Sandkalke der Reischiben-Formation aus dem Dogger je nach Sandgehalt mässig bis gut verkarstungsfähig. Ebenfalls als gutes Karstgestein gilt die Schratte-Kalk-Formation der Oberen Kreide. Diese kommt im Untersuchungsgebiet allerdings nur im Axen-Südlappen vor.

Der Griessental-Karst liegt in der Rimistock-Einheit, der Bannalp-Karst in der Walenstock-Einheit (Abb. 3). Die beiden Einheiten scheinen weitgehend hydrogeologisch voneinander isoliert zu sein, denn sie wurden überwiegend entlang der weichen und abdichtenden Mergel-Formationen von ihrer ursprünglichen Basis abgeschert und übereinander geschoben. Untergeordnete Fliessverbindungen – insbesondere entlang von Störzonen – sind aber nicht auszuschliessen.

### Die Karstquellen in Engelberg und Grafenort

Im Untersuchungsgebiet sind insbesondere im Raum Engelberg und Grafenort mehrere grosse und zahlreiche kleine Karstquellen bekannt (Abb. 7). Sie liegen allesamt im Westen der beiden Karstgebiete, was mit dem oben erwähnten Einfallen der Faltenachsen zusammenhängen dürfte.

Bei den grossen Karstquellen in Engelberg und Grafenort nahm die HGU zwischen August 2003 und Ende 2006 Pegelmessungen vor. Schüttungs-

anstiege und -rückgänge konnten so registriert und zusammen mit weiteren Angaben wie Niederschlagsmengen, Schneefallgrenze usw. interpretiert werden. Die Bauherrschaft der Steilrampe Engelberg überwachte gleichzeitig die Schüttung des aus dem Tunnel ausfliessenden Karstwassers durch eine Drucksonde in einem Messkanal. Die aus den Abflussmessungen gewonnenen Erkenntnisse wurden in den Publikationen von HENDRY & TRÜSSEL (2006), HENDRY & TRÜSSEL (2007) und BOLLER (2007) ausführlich dokumentiert.

Die langjährigen Messungen zeigen, dass die Karstquellen an der Nordflanke des Horbistales in Engelberg ein zusammenhängendes Überlaufsystem bilden. Die Quelle Mülibrunnen Süd bildet zusammen mit den direkten Abflüssen ins Grundwasser den Basisabfluss des Karstsystems. Sie liegt nur knapp über dem lokalen Lockergesteins-Grundwasserleiter und während den letzten Jahren wurde nie ein vollständiges Trockenfallen beobachtet. Ein weiterer Basisabfluss könnte aufgrund der gleichen Verhältnisse die Quelle Hinter Horbis (Suurbrunnen) im hinteren Teil des Horbistales sein. Die übrigen Quellen sind Entlastungsquellen, welche zumindest zeitweise trockenfallen und erst bei erhöhtem Wasseranfall der Reihe nach anspringen. Systematische Auswertungen zeigen deutlich, dass eine gegenseitige Abhängigkeit besteht.

Die Zusammenhänge sind exemplarisch im Zeitraum vom 4. bis 6. Juli 2005 ersichtlich (Abb. 4). Am 4. Juli 2005 wiesen die Sieben Quellen tags-

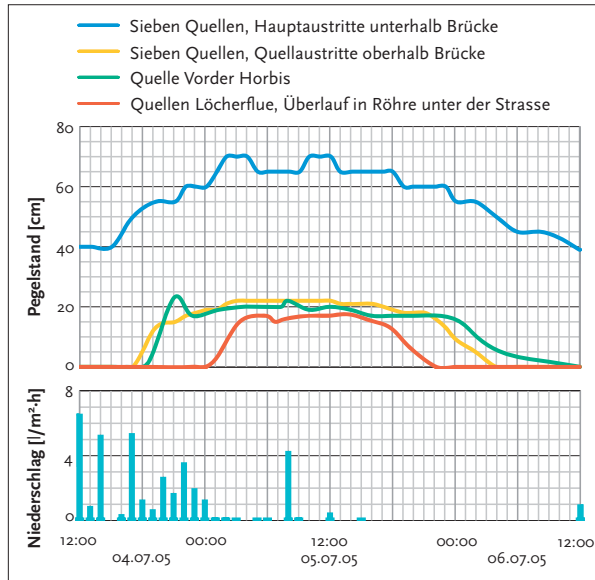


Abb. 4

über einen für diese Jahreszeit typischen mittleren Abfluss von zirka 40 cm auf (entspricht ca. 2700 l/s). Die Quellen im Vorder Horbis und in der Löcherflue lagen ebenfalls – wie meistens – trocken. Am Nachmittag stieg der Abfluss der Sieben Quellen stetig an. Dies ist bedingt durch die hochsommerliche Witterung am Vormittag mit dem Schmelzen von letzten Schneefeldern und Eis am Griessengletscher sowie durch die ab Mittag einsetzenden Niederschläge. Bei einem Pegelstand von 50 bis 55 cm bei den Sieben Quellen sprangen dann am Abend fast gleichzeitig die oberen Quelltopfe der Sieben Quellen und die Quelle Vorder Horbis an (Abb 5). Einige Stunden später (5. Juli 2005, ca. 2 Uhr) stieg der zuvor trockene Baggersee in der Löcherflue so weit an, dass Wasser durch das Entlastungsrohr in den Bärenbach abfloss. Um 6 Uhr morgens wurde die Hochwasserspitze erreicht. Als verzögerte Reaktion auf die am Vorabend nachlassenden Niederschläge und die auf 2000 m ü.M. abgesunkene Nullgradgrenze gingen die Schüttungen der Quellen allmählich wieder zurück. Die Wasseraustritte

in der Löcherflue fielen am 5. Juli 2005 spät abends wieder trocken. Die Quelle Vorder Horbis und die oberen Quelltopfe der Sieben Quellen folgten wenige Stunden später und versiegten am Morgen des 6. Juli 2005, als der Pegelstand der Hauptaustritte der Sieben Quellen wiederum zwischen 50 und 55 cm lag.

Die Chaltibachquelle in Grafenort zeigt ein für Karstquellen typisches Schüttungsverhalten – vergleichbar mit den Sieben Quellen in Engelberg. Der künstlich geschaffene Karstwasserabfluss der zb-Steilrampe zeigt grundsätzlich einen ähnlichen Schüttungsverlauf wie die nördlich gelegene Chaltibachquelle. Unterschiede bestehen darin, dass die Hochwasserspitzen weit weniger ausgeprägt ausfallen und die Schüttungsanstiege etwas früher einsetzen. Das «gedämpfte» Schüttungsverhalten ist vermutlich auf die abflusslimitierende Wirkung der nach den Wassereintrüben erstellten Fassungsbauwerke und das zu diesem Zeitpunkt im Südbereich des Tunnelabschnitts in der Quinten-Formation (inkl. Tunnelklufthöhle) fertiggestellte Druckgewölbe zurückzuführen.

### Eingabe- und Beprobungsstellen

Als Eingabestellen für die Farbstoffe wurden fünf Stellen an der Erdoberfläche mit einer Schmelz- oder Regenwasserschwinde ausgewählt, also Orte wo Oberflächenwasser konzentriert und rasch in den Karstuntergrund eindringt (Tab. 1 und Abb. 6). Da erfahrungsgemäss während Niederschlägen bei allen Eingabestellen genügend Wasser vorhanden ist, konnte auf zusätzliches Nachspülen ver-

Abb. 4  
Pegelmessungen der Karstquellen in Engelberg sowie Niederschläge zwischen dem 4. Juli 2007, mittags, und 6. Juli, 2007, mittags.

zichtet werden. Bei der Auswahl und Zuweisung der Markierstoffe wurde darauf geachtet, dass bei den späteren Analysen der fluoreszierenden Farbstoffe problematische Überlagerungen möglichst verhindert werden.

Für den Nachweis der Farbstoffe an den Quellaustritten und Fassungen stehen drei Methoden zur Verfügung:

- Das Exponieren von Aktivkohle in kleinen Säcken im Quellwasser ermöglicht den Nachweis von Farbstoffen über eine längere Zeit ohne grossen Personalaufwand. Die Analyse der Aktivkohle auf Farbstoffe erfolgt im Labor.
- Die direkte Beprobung und Analyse der Wasserproben im Labor erlaubt das Bestimmen der Farbstoffkonzentration zu einem genauen Zeitpunkt. Die Analysegeräte können feinste Spu-

ren der Farbstoffe identifizieren. Für schwer zugängliche Probenahmestellen lohnt sich der Einsatz automatischer Probenahmegeräte.

- Feldfluorimeter können direkt im Quellwasser Farbstoffkonzentrationen messen und speichern. Sie erreichen allerdings die Genauigkeit der Labormessgeräte bei weitem nicht und ihr Einsatz ist auf spezifische Farbstoffe limitiert. Die Messwerte stehen schon während der Versuchsdurchführung zur Verfügung.

Die Probenahmestellen wurden aufgrund der Vorkenntnisse aus dem Markierversuch 1999 (HENDRY 2000), der Interpretation der geologischen Situation sowie anhand zeitaufwändiger Feldbegehungen bestimmt (Abb. 7). Dabei wurden die bekannten Karstquellen auf der Höhe der Talböden bei Engelberg und Grafenort als die wichtigsten Pro-

Tab. 1: Farbstoffeingabestellen und Eingabestellen Wasserrfärbung 2005

Karstgebiet	Eingabeort	Höhe	Situation	Farbstoff	Menge	Abfluss	Eingabezeit
Bannalp	Oberfeldcharen	2200 m ü.M.	Temporärer Wasserlauf in Karstspalte neben Eingang zur Gouffre Faisoifici	Uranin	U 1,5 kg	40 l/min	14:30
Bannalp	Sätteliteufi	2300 m ü.M.	In Schluckloch abfließendes Schmelzwasser aus Schneefeld	Amidorhodamin G	A 2 kg	30 l/min	13:40
Griessental	Höchen Griessbänder	2400 m ü.M.	Regenwasserrinne auf Karstplatte	Sulforhodamin B	S 2,9 kg	60 l/min	13:40
Griessental	Griessfirn	2500 m ü.M.	Gletscherbachschwinde	Eosin	E 2,5 kg	100 l/s	13:40
Griessental	Änggriessen	2400 m ü.M.	Schneefeld mit Schmelzwasserrinnen im Karrenfeld	Pyranin	P 4 kg	insgesamt 70 l	13:40



Abb. 5

benahmestellen beurteilt. Diese wurden sowohl durch Aktivkohle, wie auch mittels Probenahme in regelmässigen Abständen überwacht. Zahlreiche weitere Quellen und Fassungen, bei welchen ein Farbstoffaustritt weniger wahrscheinlich, aber möglich schien, wurden nur mit Aktivkohle überwacht (Abb. 7).

Es ist anzumerken, dass die Wasserproben aus der zb-Steilrampe nicht direkt bei den Eintrittsstellen im Tunnel sondern erst am Nordportal entnommen werden konnten. Die Farbstoffe benötigten jedoch für das Zurücklegen der Tunnelstrecke in der Rigole etwa ähnlich lange wie im verkarsteten Felsen.

Für die Aufzeichnung der Niederschläge sowie der Tagesmitteltemperaturen stand insbesondere die Messstelle der MeteoSchweiz in Engelberg (Standort Kloster Engelberg) zur Verfügung. Die Schüttung der Talquellen wurde anhand von Pegelablesungen überwacht, welche mit der Salzverdünnungsmethode geeicht wurden. Bei den Probenahmen wurde ebenfalls die Temperatur, der pH-Wert und die Leitfähigkeit des Wassers gemessen.

### Verlauf der Wasserfärbung

Das Zeitfenster für die Wasserfärbung wurde auf Mitte Juni bis Mitte Juli festgelegt, denn in diesem Zeitraum liegt der Karstwasserspiegel infolge der Hochlagenschneesmelze hoch. Dadurch waren die meisten Talquellen aktiv und konnten beprobt werden. Die Einfärbung musste bei zusätzlichem Regen erfolgen, damit möglichst auch die Überlaufquellen aktiv waren und die Farbstoffe zügig in den Untergrund gespült wurden.

### Die Wettersituation im Vorfeld der Wasserfärbung

Rund ein Monat vor der Färbung fielen in Engelberg kaum Niederschläge. Noch am 9. Juni lag die Tagesmitteltemperatur in Engelberg (1000 m ü.M.) lediglich bei 7 °C. Danach stieg die Temperatur kontinuierlich an und im letzten Drittel des Monats herrschte eine Hitzewelle, bei der die Nullgradgrenze stets über 4000 m ü.M. lag. Am 29. Juni zog eine heftige Wetterfront mit Sturm und Hagel durch die Schweiz. Die Front schwächte sich am Alpenrand zwar ab, in Engel-

Abb. 5  
Sieben Quellen in Engelberg am 10. Juni 2004 bei einem Pegelstand von 55 cm (Pegelmesser nicht im Bild).  
(Foto: Martin Trüssel)

berg fielen zwischen dem 29. Juni und dem 1. Juli aber immerhin 55 l/m<sup>2</sup> Niederschlag. Bei hochsommerlichem Wetter stieg die Nullgradgrenze anschliessend wieder von 3000 auf 4200 m ü.M.

Dieses Wettergeschehen führte dazu, dass die Karstsysteme Anfang Juli mit reichlich Wasser gespeist wurden und die Karstquellen entsprechend viel Wasser führten. Nachdem für den Nachmittag des 4. Juli 2005 wiederum Niederschläge prognostiziert wurden, waren die Bedingungen für eine erfolgreiche Wasserfärbung erfüllt.

Am Morgen war es noch schön und sehr warm und die Nullgradgrenze lag auf 4000 m ü.M. Stark fallender Luftdruck und gegen Mittag rasche Quellwolkenbildung kündigten den raschen Wetterumschlag an. Eine Gewitterfront zog innerhalb einer halben Stunde von den Voralpen ins Engelbergertal. Zuerst erreichte der Niederschlag um 14:15 Uhr die Bannalp mit den Eingabestellen Sätteliteufi und Oberfeldcharen, dann leicht verzögert die Höchen Griessbänder und den Änggriessen und schliesslich mit rund zehn Minuten Zeitdifferenz den Griessenfirn. In Engelberg zeichnete die Messstation Kloster Engelberg lediglich 6 l/m<sup>2</sup> Regen und Graupel auf. Im Einzugsgebiet oberhalb 2000 m ü.M. dürfte es mehr gewesen sein. Vier Farbstoffe wurden um 13:40 Uhr eingegeben (siehe Tab. 1). Einzig im Oberfeldcharen wurde das Uranin 50 Minuten später eingegeben, da kurzfristig auf eine andere Eingabestelle ausgewichen werden musste.

Abb. 6  
Einspeisung des Farbstoffes Eosin unterhalb des Griessenfirns.  
(Foto: Martin Trüssel)



Abb. 6

### Die Wetterentwicklung nach der Eingabe

Nach dem Durchzug der Gewitterfront mit eher mässigen Niederschlägen folgte eine kurze Regenschauern 24 l/m<sup>2</sup> (Station Engelberg). Das Wettergeschehen in den Tagen nach der Farbstoffeingabe war von einer Tiefdruckrinne bestimmt. Bis am 12. Juli wurden täglich 2 bis 10 l/m<sup>2</sup> Niederschlag gemessen. Zeitweise sank die Null-

gradgrenze unter 2000 m ü.M. Die Tagesmitteltemperatur lag in dieser Periode in Engelberg bei 10 °C. Danach setzte eine trockene Phase mit Tagesmitteltemperaturen bei knapp 20 °C und einem Anstieg der Nullgradgrenze auf 4000 m ü.M. ein. Am 18. Juli folgte ein kräftiges Gewitter mit 31 l/m<sup>2</sup> Niederschlag innerhalb von drei Stunden. Im Hinter Horbis ereignete sich dadurch ein Gerölleinschub in den Bärenbach. Auch bei der Bergwaldquelle löste sich eine kleinere Rutschung.

#### Probenahme

Die Beprobung und Überwachung der Quellen wurde in eine Intensiv- und eine Folge-Phase mit einem ausgedünnten Probenahmerhythmus unterteilt. Während der intensiven Phase – vom Mittag des 4. Juli bis am 10. Juli 2005 – wurden die Karstquellen auf Höhe der Talböden in Engelberg und Grafenort mehrmals täglich, im Zeitraum der Hauptdurchgangskurven bis stündlich beprobt. Den wichtigen, aber abgelegenen Quellen oberhalb von Engelberg (Brunni, Tellenstein, Unter Zieblen, Dagenstal) wurden einmal pro Tag Wasserproben entnommen. Bei der Quelle Bergwald Nord wurde das Probenahmeprogramm aufgrund der durch die geringere Durchlässigkeit des Untergrundes beobachteten Verzögerung angepasst. In der weniger intensiven Phase ab dem 11. Juli 2005 wurden nur noch die Talquellen beprobt (ein- bis dreimal täglich). Zudem wurden bei diesen auch die Aktivkohlesäckchen ausgewechselt. Aufgrund des Hochwasserereignisses vom 22./23. August 2005, welches in Engelberg grosse Überschwemmungsschäden verursachte,

wurden insbesondere im Aawasser sowie bei einigen Quellen mit grossen Schüttungen die Aktivkohleproben von den Wasserfluten mitgerissen oder verschüttet. Der grösste Teil der Säckchen konnte aber von August bis Oktober 2005 geborgen werden.

#### Unterirdische Fliessverbindungen

Insgesamt wertete die HGU im Labor der ETH über tausend Wasser- und mehr als hundert Aktivkohleproben aus. In Tabelle 2 sind alle nachgewiesenen Fliessverbindungen aufgeführt. In den übrigen Proben konnten keine eindeutigen Farbstoffkonzentrationen über der Nachweisgrenze gemessen werden. In Abbildung 7 sind die nachgewiesenen Fliessverbindungen dargestellt. Für die Interpretation der Wasserfärbung wurden nur die Nachweise herangezogen. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass sehr kleine Konzentrationen und äusserst kurzzeitige Farbstoffdurchgänge nicht erfasst wurden.

Das im Änggriessen eingespeiste Pyranin konnte weder in Aktivkohle- noch in Wasserproben eindeutig nachgewiesen werden. In den Talquellen von Engelberg bestanden vereinzelte Hinweise auf sehr geringe Konzentrationen, die jedoch unter der Nachweisgrenze lagen und kein einheitliches Bild ergaben. Somit ist die Entwässerung dieses Gebietes weiterhin ungeklärt.

Das in den beiden Karstgebieten Bannalp und Griessental einsickernde Wasser legt weite Wege

Tabelle 2: Zusammenstellung der nachgewiesenen Fliessverbindungen, der Rückgewinnungsraten der Farbstoffe sowie der berechneten Abstandsgeschwindigkeiten.

Eingabestelle	Probenahmestelle		maximal gemessene Konzentration [ppb]	Rückgewinnungsrate	Dauer bis zum Erstauftreten	maximale Abstandsgeschwindigkeit [m/h]	dominierende Abstandsgeschwindigkeit [m/h]
Oberfeldcharen (Uranin)	Nordportal zb-Steilrampe (Tm 1700 bis 2000)	(13)	56.6	16%	10h 20'	485	370
	Chaltibachquelle	12	22.2	34%	17h 0'	325	295
	Bergwald-Quelle Nord	14	0.68	0.4%	75h 40'	65	20
Sätteliteufi (Amidorhodamin G)	Nordportal zb-Steilrampe (Tm 1700 bis 2000)	(13)	35.9	6.2%	8h 40'	580	520
Höchen Griessbänder (Sulforhodamin B)	Mülibrunnen Süd	1	12.9	2.9%	12h 20'	520	400
	Mülibrunnen Nord	2	9.7	1.1%	12h 30'	520	410
	Sieben Quellen	3	15.8	45%	10h 30'	550	405
	Vorder Horbis	4	9.1	1.3%	11h 40'	430	335
	Löcherflue	5	11.1	0.5%	13h 45'	350	310
	Hinter Horbis (Suurbrunnen)	6	8.0	0.2%	12h 50'	315	245
Griessenfirn (Eosin)	Mülibrunnen Süd	1	20.8	3.9%	9h 25'	750	595
	Mülibrunnen Nord	2	13.9	1.7%	8h 30'	830	600
	Sieben Quellen	3	20.6	45%	7h 30'	840	630
	Vorder Horbis-Quelle	4	26.2	2.7%	9h 10'	610	540
	Löcherflue-Quellen	5	6.7	0.2%	11h 05'	485	415
	Hinter Horbis (Suurbrunnen)	6	14.0	0.3%	8h 45'	525	380

zurück (tiefe Zirkulation). Die Abstandsgeschwindigkeiten (bis zu 800 m/h) sind mit Ausnahme der Quelle Bergwald Nord im Vergleich zu Werten aus anderen Wasserfärbungen in alpinen Karstgebieten sehr schnell (z.B. Käss 1992). Um diese zu erreichen, muss das Wasser ohne Zwischenstauer durch «offene» Höhlengänge und Klufspalten geflossen sein. Ein temporärer Rückstau entstand vermutlich erst im Bereich der Talquellen durch die beschränkten Abflusskapazitäten und die Lockergesteinsüberdeckung.

Aufgrund der gemessenen Konzentrationen in den Wasserproben und den Quellschüttungen wurde die Rückgewinnungsrate der eingegebenen Farbstoffe berechnet (Tab. 2). Die Rückgewinnungsraten der Farbstoffe Eosin und Sulforhodamin B, welche im Griessenkarst eingegeben worden waren, sowie das im Bannalp-Karst eingegebene

Uranin waren mit ungefähr 50 % sehr hoch (WERNLI 2003). Das Amidorhodamin G, welches in der zb-Steilrampe eingegeben wurde und lediglich in der zb-Steilrampe wieder austrat, wies eine kleine Rückgewinnungsrate von 6 % auf. Der grösste Teil der nicht wiedergefundenen Farbstoffanteile floss im vorliegenden Fall vermutlich unterirdisch direkt den Talgrundwasserleitern zu. Weitere Verluste sind durch Verzögerung oder Austrittstellen ohne Probenahme erklärbar.

#### Entwässerung des Griessental-Karstes

Der Griessental-Karst entwässert aufgrund der Farbstoffnachweise eindeutig zu den entlang der Nordflanke des Horbistales gelegenen Talquellen in Engelberg. Als mutmassliche Karstwasserleiter stehen die verkarstungsfähigen Formationen des Malm und Dogger in der Rimistock-Einheit im

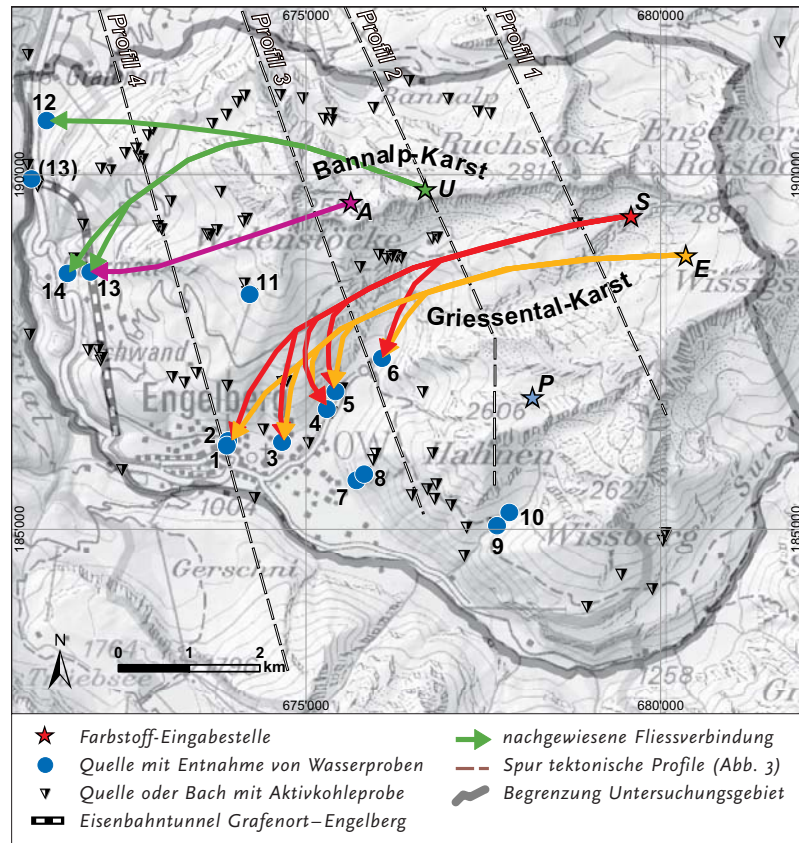


Abb. 7

Vordergrund (Abb. 3). Eine Fliessverbindung vom Griessental in Richtung der Chaltibachquelle oder der zb-Steilrampe konnte nicht nachgewiesen werden.

Für fünf Quellen in Engelberg sind die Durchgangskurven der Farbstoffkonzentrationen zusammen mit den Abflusspegeln in Abbildung 8 aufgezeichnet. Der Farbstoff Eosin mit der Eingabestelle beim Griessenfirn trat nach sieben bis acht Stunden zuerst bei den Sieben Quellen und im Vorder Horbis aus. Anschliessend wäre er mutmasslich bei der Quelle Löcherflue und schliesslich bei den Quellen Mülibrunnen Süd und Nord ausgetreten. In den Löcherfluequellen konnte der Erstaustritt aber nicht beobachtet wer-

den, da sie zu diesem Zeitpunkt noch trocken lagen. Trotz dem eigentlich kürzesten Fliessabstand traf das Eosin erst zuletzt bei der Quelle Hinter Horbis (Suurbrunnen) ein. Für den Farbstoff Sulforhodamin B von der Eingabestelle Höchen Griessbänder gilt die gleiche, aufgrund der etwas langsameren Fliessgeschwindigkeit zeitlich leicht verzögerte Reihenfolge. Für Sulforhodamin B konnte auch bei den Quellen in der Löcherflue ein Maximum festgestellt werden.

#### Interpretation der Durchgangskurven

Trotz gleichzeitiger Eingabe und grösserem Abstand zwischen Einspeisestelle und Quellen gelangte das im Griessenfirn eingegebene Eosin

Abb. 7

Mit der Wasserfärbung Griessental- / Bannalp-Karst im Juli 2005 nachgewiesene Fliessverbindungen.

Quellen: Mülibrunnen Süd und Nord (1/2), Sieben Quellen (3), Vorder Horbis (4), Löcherflue (5), Hinter Horbis bzw. Suurbrunnen (6), Tellensteinfluh (7), Unterzieblen (8), Dagenstal (9), Dagenstal Stand (10), Brunnli (11), Chaltibachquelle (12) und zb-Steilrampe Tm 1700–2000 (13, in Klammern Ausfluss beim Nordportal), Bergwald Nord (14).

Eingabestellen: Sätteliteufi (A), Oberfeldcharen (U), Höchen Griessbänder (S), Griessenfirn (E), Änggriessen (P).

(Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo [BA100395]).

vor dem Sulforhodamin B der Höchen Griessbänder zu den Talquellen in Engelberg. Das im Bereich des Griessenfirns einsickernde Wasser scheint somit den direkteren Zufluss zu den Talquellen zu haben. Dafür kann es mehrere Gründe geben:

- Die Karströhren zwischen Griessenfirn und Engelberg sind besser durchlässig bzw. von grösserem Durchmesser.
- Der effektive Fliesspfad durch die Karstgänge ist bisher weitestgehend unbekannt. Er kann durchaus zwischen den Höchen Griessbändern und Engelberg länger sein als zwischen dem Griessenfirn und Engelberg.
- Durch die direkte Eingabe in den Gletscherbach wird der Farbstoff optimal mobilisiert und vermutlich auch ein höherer Wasserdruck aufgebaut.

Die Hauptdurchgänge der Farbstoffe dauerten nur wenige Stunden mit einer klaren Spitze. Das heisst, die Farbstoffe verteilten sich im System nur schlecht und wurden schnell durchgespült – die Dispersionen<sup>1</sup> waren klein. Die Dispersion des

Eosins war sogar noch kleiner als jene von Sulforhodamin B. Der beim Griessenfirn eingegebene Farbstoff wurde also weniger verschleppt.

Die Maxima der Farbstoffkonzentrationen lagen meistens im Bereich des Schüttungsanstieges vom 4. auf den 5. Juli 2005 oder fielen zumindest mit der Schüttungsspitze zusammen. Durch das eindringende Niederschlags- und Schmelzwasser stieg der Wasserspiegel im Karstsystem. Die dadurch verursachte Druckübertragung liess die Pegel bei den Quellen schnell anschwellen. Das zu diesem Zeitpunkt bei der Quelle austretende Wasser war bereits vor den Niederschlägen im System. Die Farbstoffe wurden knapp vor oder kurz nach Beginn der Regenfälle eingegeben. Der erste Farbstoffaustritt zeigte somit an, dass das Frischwasser aus dem Gebiet der Einspeisestelle bei der Quelle eintrifft. Diese Beobachtung wurde insbesondere durch die Leitfähigkeitsmessungen im Quellwasser gestützt. Diese geben einen Hinweis auf den Gehalt an Salzen, welche im Kontakt mit den Gesteinen im Wasser gelöst werden. Bis zum Eintreffen der Farbstoffe blieb die Leitfähigkeit beispielsweise bei den Sieben Quellen konstant, da immer noch Wasser ausfloss, welches bereits länger im Untergrund war. Erst mit dem Erstaustritt des Eosins sank die Leitfähigkeit allmählich. Dies, weil das Frischwasser weniger lang im Untergrund verweilte und daher weniger Zeit hatte, Salze aus den Gesteinen zu lösen.

<sup>1</sup> Die Dispersion bezeichnet den Prozess der Ausbreitung des Farbstoffes im Wasser (genaue Definition in Käss 1992).

Die Farbstoffe wurden an Stellen eingegeben, wo das Wasser potentiell schnell und konzentriert in das tiefere, gut durchflossene Karstsystem gelangt. Regenwasser tritt jedoch über das ganze Einzugsgebiet verteilt auf und sammelt sich zuerst im oberflächennahen Epikarst, bevor es zusammengeführt wird und dem tieferen System zufließt. Daher liegen die Maxima der Farbstoffkonzentrationen zeitlich leicht vor den Schüttungsspitzen. Das gefärbte Wasser wurde also vor der Hochwasserwelle durch die hochdurchlässigen Zonen resp. Röhren des Karstsystems gedrückt. Dadurch hatte der Farbstoff auch wenig Gelegenheit, liegen zu bleiben oder sich zu verteilen.

### Entwässerung des Bannalp-Karstes

Viele Folgerungen für die in Engelberg nachgewiesenen Fließwege gelten ebenso für die Chaltibachquelle und die zb-Steilrampe: hohe Abstandsgeschwindigkeiten, geringe Dispersion und gut ausgebildetes Karstsystem (Abb. 9).

Die Chaltibachquelle ist als Überlauf eines bedeutenden Karstwasseraustrittes in den Talgrundwasserleiter bekannt (HENDRY 2000). Aus der hohen Farbstoff-Rückgewinnungsrate kann geschlossen werden, dass sie ihr Wasser zu einem grossen Teil aus dem Gebiet Oberfeldcharen (Eingabestelle von Uranin) bezieht. Ein Nebenaustritt dieses Wassers befindet sich in der zb-Steilrampe sowie in der damit hydraulisch verbundenen Quelle Bergwald Nord (Abb. 3).

Der einzig sichere Austritt des Farbstoffes Amidorhodamin G, welcher in der Sätteliteufi inmitten der Walenstöcke eingegeben wurde, konnte in

der zb-Steilrampe nachgewiesen werden. In der Chaltibachquelle und in der Bergwald-Quelle Nord wurde er nicht detektiert.

Durch die Ergebnisse der in der zb-Steilrampe an verschiedenen Stellen angebrachten Aktivkohlesäckchen und den direkt im Tunnel entnommenen Wasserproben konnte bestätigt werden, dass Uranin und Amidorhodamin G eindeutig innerhalb der Tunnelstrecke Tm 1700 bis 2000, also innerhalb der Quinten-Formation, zufließen.

Der Austritt von Uranin bei der Bergwald-Quelle Nord ist mit sehr kleinen Konzentrationen über vergleichsweise lange Zeit gespreizt. Das Karstwasser tritt unterirdisch vom anstehenden Fels zuerst in die Sackung Schwand über und sickert dann die letzte Strecke durch weniger gut durchlässiges Lockergestein. Auf diesem Fließpfad durchmischt sich der Farbstoff stark mit dem Hangwasser und wird verschleppt, was zu einer breiten Farbstoffdurchgangskurve und tieferen Konzentrationen führt. Entsprechend sind auch die Abstandsgeschwindigkeiten der nachgewiesenen Fließverbindungen deutlich langsamer als bei den anderen Quellen.

Abb. 8  
Normierte Durchgangskurven der Farbstoffkonzentrationen und Pegelmessungen bei den Engelberger Quellen: Mülibrunnen Süd, Sieben Quellen, Vorder Horbis, Löcherflue und Hinter Horbis. Pegelstände (blau), Konzentration von Eosin (gelb) und von Sulforhodamin B (rot). Unten die Zeitachse in Stunden seit der Farbstoff-Eingabe. Normiert: Farbstoffkonzentration in Quellwasser pro 1 Kilogramm eingegebenem Farbstoff, 1 ppb = 1 µg/kg.

Die Entwässerung des Bannalp-Karstes erfolgt generell entlang dem Einfallen der Faltenachsen gegen Westen (vgl. Kapitel zum geologischen Aufbau). Aufgrund der uneinheitlichen Farbstoffnachweise in den Wasseraustritten muss es für den Bannalp-Karst jedoch mindestens zwei verschiedene Fließverbindungen zu den Austrittsstellen geben. Die konkreten Fließpfade und die Abgrenzung der Teileinzugsgebiete bleiben weiterhin unbekannt. Die derzeitigen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen (Abb. 3):

- Die Chaltibachquelle liegt im Axen-Südlappen. Aus der Wasserfärbung 1999 ist bekannt, dass zwischen Oberfeldcharen bzw. der Felsen oberhalb der Oberfeldalp Fließverbindungen zur Chaltibachquelle bestehen. Daraus wurde ein Fließweg von der Walenstock-Einheit direkt in den Axen-Südlappen abgeleitet. Diese Fließverbindung wurde durch die Wasserfärbung 2005 bestätigt.
- Der Farbstoff Uranin aus dem Oberfeldcharen trat als Nebenaustritt in der verkarsteten Quinten-Formation der zb-Steilrampe (Tm 1700 – 2000) und in der Quelle Bergwald Nord aus. Beide liegen im Bereich der Scheideggstock-Einheit. Daher muss von der Walenstock-Einheit neben der oben postulierten Fließverbindung eine weitere zur Scheideggstock-Einheit existieren. Der Übertrittspfad ist entweder direkt – vermutlich auf gut durchlässigen Störzonen – oder mit einem «Umweg» über den Axen-Südlappen möglich. Der Farbstoff traf zuerst beim Nordportal der zb-Steilrampe ein. Der Erstaustritt bei der Chaltibachquelle erfolgte

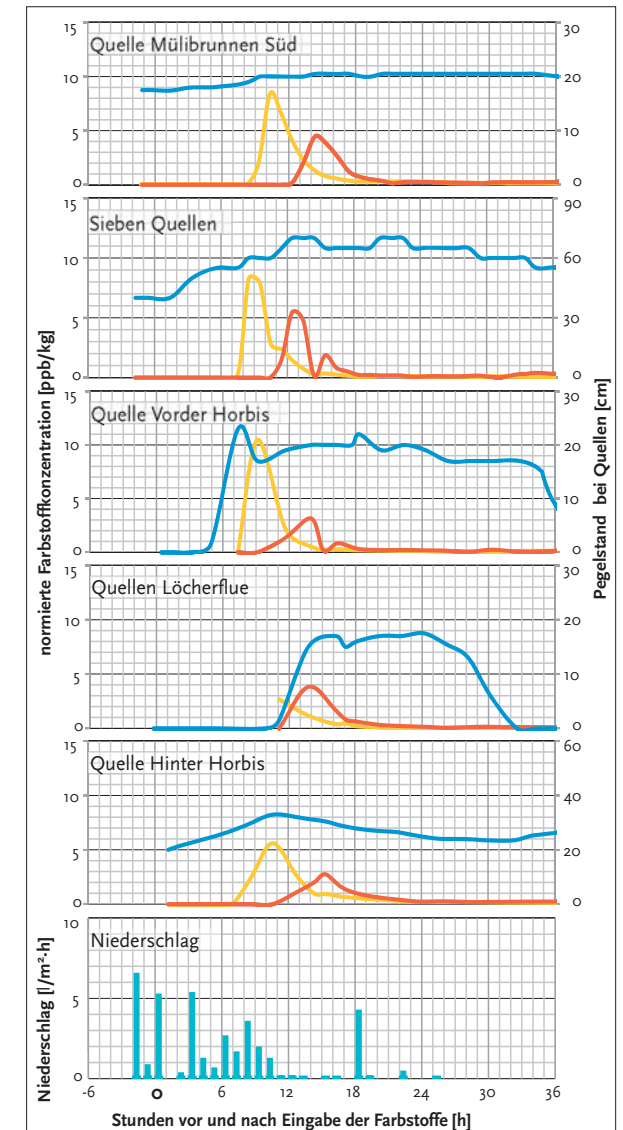


Abb. 8

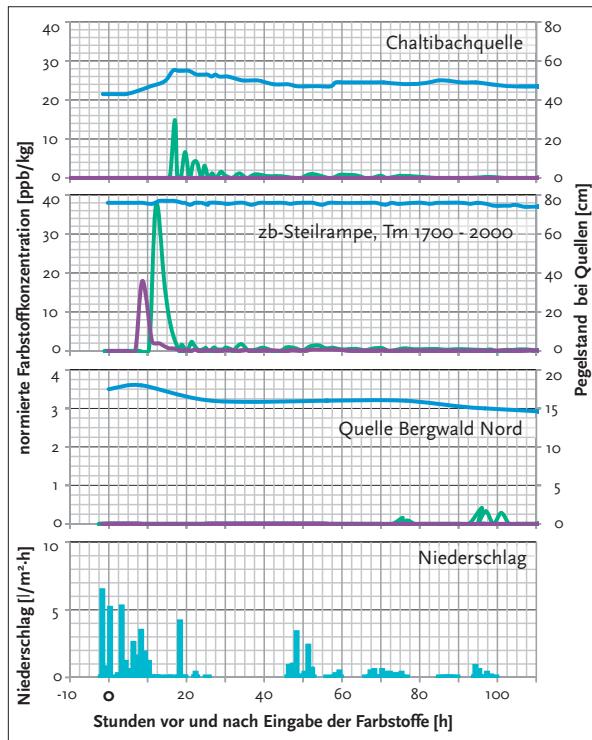


Abb. 9

einige Stunden später. Das mit Uranin gefärbte Wasser bewegte sich also schneller zur zb-Steilrampe als zur Chaltibachquelle. Dieser Zeitunterschied kann als Hinweis gewertet werden, dass ein Teil des Wassers aus der zb-Steilrampe von der Walenstock-Einheit ohne «Umweg» über den Axen-Südlappen in die Scheideggstock-Einheit fliesst. Die Hypothese der unabhängigen Fliessverbindungen bietet auch eine Erklärung, weshalb Amidorhodamin G (Sätteliteufi) nur in der zb-Steilrampe und nicht auch in der Chaltibachquelle austrat.

- Ein Zufluss zur Chaltibachquelle über die Scheideggstock-Einheit ist eher unwahrscheinlich, da bei der Chaltibachquelle kein Amidorhodamin G (Sätteliteufi) nachgewiesen wurde. Weiter hätte sich die Schüttungscharakteristik der Chalti-

bachquelle durch die künstliche Karstwasser-Drainage in der zb-Steilrampe verändern müssen, was bisher nicht festgestellt wurde.

### Besondere hydrologische Bedingungen während der Wasserfärbung

Die durch die Wasserfärbung im Jahr 2005 nachgewiesenen Fliessverbindungen repräsentieren die Entwässerung der beiden Karstgebiete bei den damaligen hydrologischen Bedingungen. Die Erkenntnisse dürfen daher nur vorsichtig verallgemeinert werden:

- Der Markierversuch vom Juli 2005 wurde während der Schneeschmelze und knapp vor intensiven Niederschlägen durchgeführt. Diese Hochwasserbedingungen führen zu sehr ho-

Abb. 9  
Normierte Durchgangskurven der Farbstoffkonzentrationen und Pegelmessungen bei den Quellen um Grafenort: Chaltibachquelle, Karstwasseraustritte in der zb-Steilrampe zwischen Tm 1700 und Tm 2000 sowie Bergwald Nord. Pegelstände (blau), Konzentration von Uranin (grün) und von Amidorhodamin G (violett). Unten die Zeitachse in Stunden seit der Farbstoff-Eingabe. Normiert: Farbstoffkonzentration in Quellwasser pro 1 Kilogramm eingegebener Farbstoff, 1 ppb = 1 µg/kg.

- Die Austrittszeiten der Farbstoffe sind recht kurz. Die für die Auswertung wichtigen Konzentrationsmaxima konnten möglicherweise nicht überall exakt gemessen werden, was sich insbesondere auf die Qualität der Aussagen zu den Rückgewinnungsraten auswirkt.
- Die speziellen Bedingungen während des Markierversuches können auch Auswirkungen auf die nachgewiesenen Fliessverbindungen haben. Im Bannalp-Karst begann der Niederschlag früher als im Griessen-Karst. Stieg der Karstwasserspiegel auf Seite der Bannalp schneller an, könnte der höhere Wasserdruck im Norden zumindest in der Hochwasserphase den Zufluss von Wasser aus dem südlich gelegenen Griessen-Karst in Richtung der zb-Steilrampe unterbunden oder stark eingeschränkt haben. Aufgrund der Tektonik sollte die Möglichkeit eines Karstwasserübertrittes von der Rimistock-Einheit in die Scheideggstock-Einheit auch weiterhin nicht ausgeschlossen werden.

### Vergleich mit der Wasserfärbung 1999 im Bannalp-Karst

Der Markierversuch 1999 erfolgte im Oktober. Während der Einspeisung fielen Niederschläge mittlerer Intensität, in den höheren Lagen in Form von Schnee, welcher in den Folgetagen wieder vollständig schmolz. Beim Markierversuch 2005 wurde im Oberfeldcharen derselbe Farbstoff

an der praktisch gleichen Stelle wie 1999 eingegeben. Es zeigen sich folgende Parallelen beziehungsweise Unterschiede:

- Die 1999 an drei Stellen im Bannalp-Karst eingegebenen Farbstoffe flossen aufgrund des kleineren Wasserandrangs mit deutlich niedrigeren Fliessgeschwindigkeiten zur Chaltibachquelle. Die maximale Abstandsgeschwindigkeit zwischen Oberfeldcharen und Chaltibachquelle betrug 130 m/h (im Vergleich zu 325 m/h im Markierversuch 2005). Die Dispersion der Farbstoffe war 1999 entsprechend viel grösser und die Durchgangskurve daher deutlich länger.
- Die Bergwaldquelle und die zb-Steilrampe konnten 1999 nicht beprobt werden, da die Bergwaldquelle während des Versuches bereits trocken lag und die zb-Steilrampe noch nicht gebaut war. Für die Sieben Quellen konnte ebenfalls keine Fliessverbindung zum Bannalp-Karst nachgewiesen werden. Die schwachen Farbstoffnachweise aus dem Markierversuch 1999 entlang der Südflanke der Walenstöcke konnten durch die Färbung im Jahr 2005 nicht bestätigt werden.

### Karsthydrologische Modellierung

Basierend auf den Daten der langjährigen Quellbeobachtungen und der Wasserfärbung 2005 entwickelte BOLLER (2007) für das Griessental ein karsthydrologisches Abflussmodell. Mit Hilfe der Durchflusszeiten der Markierstoffe und der Quellschüttungen können die hydraulischen Verbindungen des Einzugsgebiets mit den Engelberger

Talquellen als Basis- und Hochwasserüberlaufsystem quantitativ beschrieben werden. So lässt sich das Schüttungsverhalten der wichtigsten Engelberger Karstquellen aus den Wetterdaten näherungsweise simulieren. Der Vergleich des gemessenen Schüttungsverlaufs mit der berechneten Kurve zeigt, wie gut das Modell ist.

### Das numerische Modell

Die konkrete Ausbildung der unterirdischen Fließwege und das Fassungsvermögen des Karstwasserspeichers im Griessental sind nicht bekannt. Deshalb ist es auch nicht möglich, den Karstwasserabfluss mit exakten hydraulisch-physikalischen Formeln zu berechnen.

Aus Erkenntnissen der speläologischen Erforschung des Griessentals durch die HGU und angelehnt an ein vereinfachtes Karstschema von BAKALOWICZ (2005) wurde in BOLLER (2007) für das Griessental ein numerisches Modell entwickelt, das die Durchfluss- und Speicherkomponenten des Karstes als Konzept wiedergibt. Dieses Modell erlaubt die Simulation der Quellschüttungen aufgrund der Wasserzufuhr von oben in das Karstsystem. Allerdings lassen sich aus einem solchen Modell keine direkten physikalischen Wirkungsvariablen ableiten (Abb. 10).

Das eigentliche Karstsystem wird im Modell mit Hilfe von drei Parametern in seinem Verhalten durch einen direkten Durchfluss und einen Speicher beschrieben. Das an der Oberfläche anfallende Wasser (QE) gelangt via Karströhren entweder direkt zur Quellschüttung oder wird im Karstwas-

speicher (KGS) zwischengelagert und bildet einen verzögerten Abfluss. Das Überlaufsystem, das den Löcherflue- und Horbis-Quellen entspricht, wird aktiviert, wenn der simulierte Wasseranfall bei den Sieben Quellen über deren Schüttungslimite steigt. Die im Überlaufzustand zusätzlich anspringenden Quellen reduzieren den Karstwasserspeicher um den Faktor  $s$  ( $s \sim 0.9$ ). Die Kalibrierung des Modells erfolgte schliesslich manuell anhand der Beobachtungsdaten der Quellüberwachung.

Das Karstsystem Griessental wird von direkten Niederschlägen sowie von Gletscher- und Schneeschmelzwasser gespeist. Im Modell erfolgt die Berechnung des Wassereintrags von der Oberfläche mit einem Regen- und Schneemodul sowie einem Gletschermodul: ein Teil der Niederschläge gelangt nie ins Karstsystem. Die Niederschläge verdunsten direkt von den Felsoberflächen, der Vegetation oder aus den oberen Bodenschichten (Evapotranspiration). Die so verdunstende Niederschlagsmenge wird mit Hilfe von Literaturangaben als Konstante geschätzt. Bei tiefen Temperaturen werden die winterlichen Niederschläge in Form von Schnee und Eis gespeichert und bei wärmerer Witterung als Schnee- oder Gletscher- schmelze wieder freigesetzt. Die Grenzwerte für

Abb. 10  
Schema des Karstabflussmodells Griessental:  
Aus den Eingangsdaten Niederschlag und Temperatur werden die Quellschüttungen simuliert. Überschreitet der Gesamt-abfluss aus dem Karstsystem  $QQ$  den Grenzwert  $Q_{max}$  werden die Überlaufquellen aktiv. Der Karstwasserspeicher wird dann zusätzlich um den Faktor  $s$  verkleinert.  
Modifiziert nach BOLLER (2007).

diese Schnee- und Gletschermodellierung wurden den Untersuchungen von HOCK (2003) entnommen. Der Überschuss dieser Wasserbilanz aus Niederschlägen, Verdunstung, Schnee- und Eisbildung wird im numerischen Modell als Wassereintrag ins Karstmodul geleitet.

Für die Berechnung des totalen Wassereintrages muss die Grösse und die Höhenverteilung des verkarsteten Einzugsgebietes bzw. der Anteil vergletschelter Flächen geschätzt werden. Die Geometrie der verkarstungsfähigen Quinten-Formation im Raum Engelberg–Griessental lässt auf ein theoretisches Einzugsgebiet des Karstsystems schliessen, das aus dem Gebiet Planggen–Griessental besteht. Aus tektonischer Sicht ist auch ein Zufluss aus dem Gebiet Änggriessen, in welchem der Farbstoff Pyranin eingegeben worden ist, sehr wahrscheinlich. Die Tatsache, dass diese Fließverbindung nicht schlüssig nachgewiesen werden konnte, lässt offen, ob diese nicht existiert oder ob sie aufgrund eines verpassten Durchgangs oder zu grosser Verdünnung nicht detektiert werden konnte. Die östliche Grenze des Einzugsgebietes ist noch recht unsicher – möglicherweise erstreckt es sich bis zum Blüemlisalpfinn.

Die mangelnde Verfügbarkeit der Basisdaten, wie Niederschlags-, Schneehöhen- und Verdunstungsmessungen im Einzugsgebiet (siehe auch BAGGENSTOS & NIEDERBERGER 2010) erfordert deren Interpolation aus Daten der Messstation Engelberg (1035 m ü.M.) und der Schneestation Titlis (2140 m ü.M.). Mit der Tag-Grad-Faktor-Methode

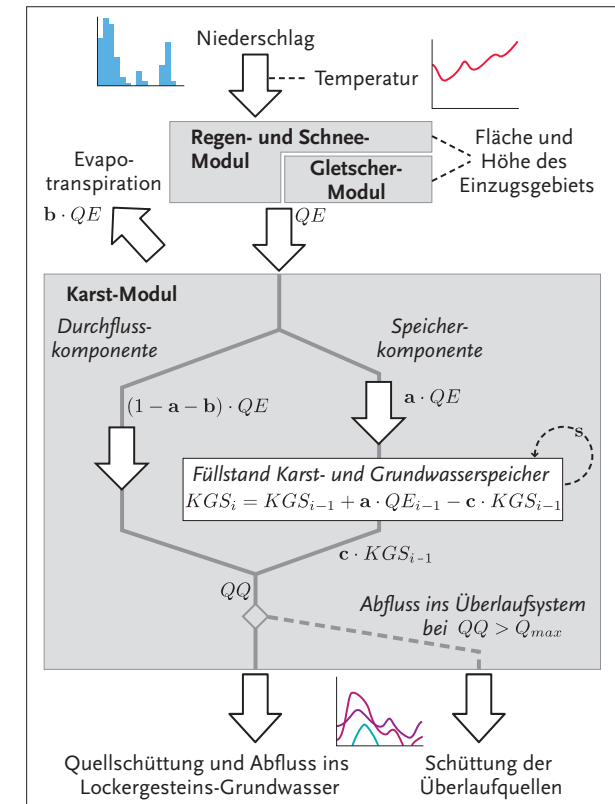


Abb. 10

nach BERGSTRÖM (1976) werden die Messdaten auf das Einzugsgebiet zwischen 2000 und 2700 m ü.M. hochgerechnet. Insbesondere Gewitterniederschläge im Einzugsgebiet von lokal sehr variabler Stärke können so jedoch nicht adäquat hergeleitet werden.

Es wurde je ein Modell mit stündlicher Auflösung und eines mit Tagesmittelwerten kalibriert. Das Stundenmodell zeigt seine Stärken bei der Wiedergabe der hydraulischen Beziehungen zwischen den einzelnen Karstquellen, hat aber über weite Strecken zu wenig genaue Eingangsdaten. Das Tagesmodell wurde über vier Jahre gerechnet und gibt die saisonalen Schwankungen sehr gut wieder (Effizienz nach NASH & SUTCLIFFE (1970) = 0.79).

### Fazit aus der Modellierung

Trotz der teilweise starken Vereinfachung können gute Resultate erzielt werden. Bekannt war bisher, dass die Überlaufquellen sehr schnell auf Niederschläge und Schneeschmelze reagieren (vgl. Kapitel zu den Karstquellen). Dass sie aber fast genau so schnell auf beginnendes Gletscherschmelzen reagieren, wurde bisher zu wenig berücksichtigt. Ein weiterer Gletscherschwund wird im Sommer also direkte Folgen auf das Schüttungsverhalten der Karstquellen haben.

Die Sieben Quellen weisen eine Schüttungslimite bei ca. 6 m<sup>3</sup>/s auf, die Quellen der Löcherflue hingegen scheinen keine Abfluss-Begrenzung zu haben. Dass die Quelle in der Löcherflue die Hochwasserüberläufe des Griessentals sind, erklärt auch deren verheerenden Wasserausbruch während des Hochwasserereignisses vom August 2005. Das Griessental-Karstmodell kann helfen, das Hochwasser-Gefahrenpotential aus dem extrem schnell abfliessenden Karsteinzugsgebiet abzuschätzen.

Das Verständnis des Karstsystems Griessental–Engelberg konnte einen Schritt weitergebracht werden. Die hydrologischen Zusammenhänge sind allerdings immer noch nur in sehr groben Zügen bekannt. Noch wenig verstanden wird die hydraulische Verbindung des Karstwassers mit dem Grundwasser des Engelbergertales. Weiter ist die speleologische Erforschung des Gebietes erst angelaufen. Die Erkundung der tiefer liegenden Karsthohlräume und der Vorstoss ins aktive System stehen noch an.

### Dank

Die Durchführung und Auswertung dieser Markierung war nur durch den grossen personellen Einsatz zahlreicher Helferinnen und Helfer und durch die Unterstützung verschiedener Institutionen möglich. Das faszinierende Resultat ist daher auch Ausdruck einer beispiellosen Zusammenarbeit. Es soll aber auch ein Ansporn sein, die Erforschung der Karstentwässerung auf Basis dieser Erkenntnisse weiterzuführen.

### Literatur

- BAGGENSTOS, M. & NIEDERBERGER B.** (2010): Erhebungen zur Verbreitung und Biologie der Nidwaldner Haarschnecke (*Trochulus biconicus*). – Naturforschende Gesellschaft Obwalden und Nidwalden, Grafenort. Band 4 (2010), Naturforschung in Obwalden und Nidwalden.
- BAKALOWICZ, M.** (2005): Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeol. J.* 13, pp 148–160.
- BERGSTRÖM, S.** (1976): Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI, Report No. RHO 7, Norrköping, Sweden.
- BOLLER, R.** (2007): Karstwasserwege des Einzugsgebiets Griessental. Auswertung eines Markierungsversuchs und Abflussmodellierung. Master's diploma project, EPF Lausanne.
- FIERING, M.B.** (1967): *Streamflow synthesis*. Harvard University Press, Cambridge.
- HENDRY, F.** (2000): Entwässerung des Bannalp-Karstes. Diplomarbeit ETH Zürich, unveröffentlicht.

**HENDRY, F. & TRÜSSEL, M.** (2006): Zwischenbericht der Wasserfärbung Griessen- und Bannalp-Karst vom Juli 2005 in Engelberg / Wolfenschiessen. Ennetbürgen, Arbeitsgruppe «Markierungsversuch 2005 Karstwasserwege Engelberg» der Höhlenforschergemeinschaft Unterwalden (HGU).

**HENDRY, F. & TRÜSSEL, M.** (2007): Schüttungsverhalten der Karstquellen nordöstlich des Dorfes Engelberg (OW), Techn. Bericht z.Hd. Kt. Obwalden. Ennetbürgen, Höhlenforscher-Gemeinschaft Unterwalden.

**HOCK, R.** (2003): Temperature index melt modeling in mountain areas. *Journal of Hydrology* 282: pp.104–115.

**HUCK, E.** (2006): Caractérisation hydrodynamique des karsts de la région d'Engelberg, Diplomarbeit ETH Zürich, unveröffentlicht.

**KÄSS, W.** (1992): Geohydrologische Markierungstechnik. Lehrbuch der Hydrogeologie (Band 9). Verlag Gebrüder Borntraeger Berlin Stuttgart.

**MENKVELD, J. W.** (1995): Der geologische Bau des Helvetikums der Innerschweiz. Diss. Naturwiss. Bern. 2 Bde. (XII, 165 S.; 141 Bl. Taf. Tab., III., Karten + Anhang). [Nidwalden; Obwalden]. N1388.

**NASH, J. E. & SUTCLIFFE, J. V.** (1970): River flow forecasting through conceptual models; Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282–290.

**WERNLI, H.R.** (2003): Einführung in die Tracer-Hydrologie – Skript. Geographisches Institut Universität Bern.

### Adressen der Autoren

Fidel Hendry  
dipl. Hydrogeologe ETH  
Höhlenforschergemeinschaft Unterwalden HGU  
Hangstrasse 12, 6373 Ennetbürgen  
Fidel.Hendry@nw.ch

Beat Niederberger  
dipl. Geologe, MSc GIS  
Höhlenforschergemeinschaft Unterwalden HGU  
Winkelriedstrasse 36, 6003 Luzern  
beat@speleo.ch

Rolf Boller  
dipl. Forsting., MAS Hydrologie  
Höhlenforschergemeinschaft Unterwalden HGU  
Liechtershalten, 6382 Büren  
rolf.boller@bluewin.ch