©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Hydrogeologische Untersuchungen im alpinen Karstgebiet Gottesacker und Schwarzwassertal (Allgäu / Vorarlberg)

von Nico Goldscheider

VORARLBERGER NATURSCHAU
4
SEITE 247–294
Dornbirn 1998

Zum Autor

Studium der Geologie an der Universität Karlsruhe. Abschluß mit Auszeichnung 1997. Im Sommer 1996 verbrachte er drei Monate im Kleinwalsertal, wo er die Geländearbeiten für die hier vorgestellte Diplomarbeit anfertigte. Da er zugleich begeisterter Bergsteiger, Kletterer und Liebhaber des Alpenraumes ist, stellt die Erforschung und der Schutz von Grundwasservorkommen der Alpen nicht nur sein fachliches Interesse, sondern auch ein persönliches Anliegen dar.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 248
1. *Einführung* 249
2. *Geologie* 250
   2.1 Geologischer Rahmen 250
   2.2 Stratigraphie 252
   2.3 Tektonik 254
3. *Karstmorphologie* 256
   3.1 Begriffsdefinitionen 256
   3.2 Karstformen 257
4. *Hydrogeologie* 258
   4.1 Allgemeines zur Hydrogeologie von Karstgebieten 258
   4.2 Hydrogeologische Charakterisierung der Gesteine 260
   4.3 Hydrogeologische Gliederung des Untersuchungsgebietes 261
   4.4 Quellen und Gewässernetz 262
5. *Hydrochemie* 272
   5.1 Quellwassertemperaturen 272
   5.2 Stichtagsbeprobung bei Niedrigwasser 273
   5.3 Belastung der Aubachquelle durch den Ladstattschacht 274
6. *Der kombinierte Markierungsversuch* 275
   6.1 Allgemeines zu Markierungsversuchen 275
   6.2 Überblick 276
   6.3 Fragestellungen 276
   6.4 Auswahl der Eingabestellen 277
   6.5 Auswahl der Beobachtungsstellen 278
   6.6 Auswahl der Markierungsmittel und Eingabe 281
   6.7 Analytik 282
   6.8 Ergebnisse 282
7. *Hydrogeologische Modellvorstellung des Untersuchungsgebiets* 286
   7.1 Hydraulische Zusammenhänge 286
   7.2 Einzugsgebiete der Karstquellen 287

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
7.3 Fließgeschwindigkeiten 289
7.4 Beziehungen zwischen dem Karst und lokalen Porengrundwasserleitern 290
7.5 Mögliche Belastungen der Quellen 290
8. Danksagung 290
9. Verwendete Schriften und Karten 291
9.1 Schriften 291
9.2 Karten 293

Zusammenfassung

Das Gottesackergebiet (Vorarlberg / Bayern) ist eines der bekanntesten Beispiele für den Typus der gefalteten unbedeckten Karstplateauflächen in den Alpen. Im angrenzenden Schwarzwassertal taucht der Karstkörper unter das Flyschgebiet ab, so daß zwei völlig gegensätzliche Grundwasserlandschaften aneinander grenzen: Das Karstgebiet entwässert ausschließlich unterirdisch, das Flyschgebiet überwiegend oberirdisch.

Träger der Verkarstung ist der Schrattenkalk, ein etwa 100 m mächtiger Kalkstein, der aufgrund seiner Reinheit und seiner starken tektonischen Beanspruchung intensiv verkarstet ist. Er baut nahezu die gesamte Oberfläche des Gottesackers auf und bildet im Untersuchungsgebiet einen zusammenhängenden Karstgrundwasserleiter. Die tonig-mergeligen Drusbergschichten übernehmen die Rolle des Liegendstauers, Glaukonitsandstein und Leistmergel stellen den Hangendstauer dar.

Der Schwarzwasserbach wird aus dem oberen Schwarzwassertal und von oberirdischen Zuflüssen aus dem Flyschgebiet der orographisch rechten Talseite gespeist. Aus dem Karstgebiet der orographisch linken Seite erhält das Tal ausschließlich unterirdische Zuflüsse. Der Karstkörper im Schwarzwassertal sammelt also die vom Gottesacker abfließenden Wässer und leitet sie an die Karstquellen im unteren Schwarzwassertal weiter. Eine Estavelle, also eine Höhle, die bei Niedrigwasser als Schwinde und bei Hochwasser als Quelle wirkt, dient als Hochwasserüberlauf und verbindet den Schwarzwasserbach mit den unterirdischen Abflußwegen.

Im untersten Schwarzwassertal und im Breitachtal herrschen artesisch gespannte Verhältnisse, da dort der Karstgrundwasserleiter von den undurchlässigen Leistmergeln überlagert ist. An der Breitach besitzt dieses artesische System ein „Leck": Die wasserstauenden Schichten sind dort durchschnitten, so daß Schrattenkalk ansteht. An dieser Stelle konnte eine Grundquelle nachgewiesen werden, die den tiefsten direkten Auslaß des gesamten Karstsystems darstellt. Nicht der Schwarzwasserbach sondern die Breitach bildet demnach das Vorflutniveau.

Am 20.09.1996 wurde ein kombinierter Markierungsversuch durchgeführt. Zur Eingabe wurden 2 Stellen ausgewählt: eine Ponordoline im Schwarzwassertal und der Abwasserschacht der Bergstation Hahnenköpfle auf dem südlichen Gottesackerplateau. Als Tracer wurden die Fluoreszenzfarbstoffe Uranin und Eosin verwendet. Beide Farbstoffe konnten nach kurzer Zeit in allen Karstquellen

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
des Tales nachgewiesen werden. Dadurch wurde gezeigt, daß alle Karstquellen gemeinsam das Karstsystem entwässern und demnach weitgehend überlappende Einzugsgebiete besitzen. Dieser Sachverhalt wurde auch durch hydrochemische Ähnlichkeiten und übereinstimmende Wassertemperaturen der Karstquellen bestätigt. Es wurden extrem hohe Fließgeschwindigkeiten und entsprechend kurze Verweilzeiten festgestellt. Ein Schadstoffeintrag auf dem Gottesacker oder im Schwarzwassertal würde demnach alle Karstquellen in starkem Maße belasten.

1. Einführung

Die vorliegende Arbeit ist Teil einer Diplomarbeit im Studienfach Geologie, die am Institut für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (AGK) unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. H. Hötzl angefertigt wurde (GOLDSCHEIDER, 1997).

Neben den hier dargestellten hydrogeologischen, hydrochemischen und tracerhydrologischen Untersuchungen umfaßt die Diplomarbeit auch eine geologische und karstmorphologische Kartierung sowie umfangreiche Arbeit mit dem Geoinformationssystem ARC/INFO. Insbesondere wurde auch eine digitale Vulnerabilitätskarte konstruiert, auf der die Verletzbarkeit des Karstgrundwasserleiters gegenüber Schadstoffeinträgen dargestellt ist. Interessierte können die gesamte Arbeit im Archiv der Vorarlberger Naturschau oder beim Landschaftsschutz Kleinwalsertal einsehen oder sich an den Verfasser wenden.

Karstgrundwasser spielt im alpinen Bereich eine bedeutende Rolle. Beispielsweise deckt Österreich ca. 50 % seines Wasserverbrauchs aus Karstwasser, große Alpenstädte wie Wien und Innsbruck werden überwiegend mit Karstgrundwasser versorgt. Gleichzeitig sind Karstgrundwasserleiter besonders gefährdet: Schadstoffe können leicht ins Grundwasser gelangen und sich dort schnell und ungehindert ausbreiten (COST, 1995). Aus diesen Gründen ist Grundwasserschutz in alpinen Karstgebieten besonders wichtig. Ziel der Arbeit war es daher, die Hydrogeologie eines alpinen Karstgebietes umfassend zu bearbeiten und dabei auch die Gefährdung und den Schutz des Karstgrundwassers zu untersuchen.

Das Gottesackerplateau ist eines der spektakulärsten Karstgebiete der Alpen. Es ist hydrographisch klar abgrenzbar, nicht zu groß, durch Massentourismus und eine Altlast (den Ladstattschacht) belastet, in der geologischen und geomorphologischen Literatur ausführlich beschrieben und auf einer relativ aktuellen geologischen Karte im Maßstab 1:50'000 dargestellt. Es wurde daher als Untersuchungsgebiet ausgewählt. In der hier vorgestellten Diplomarbeit wurde die Ostabdachung des Gottesackerplateaus, die Ifenmulde, das Mahdtal und das mittlere und untere Schwarzwassertal bis zur Breitach untersucht. Darauf aufbauend wurden in den Jahren 1997 und 1998 im Rahmen der Promotion des Verfassers und drei weiteren Diplomarbeiten auch das obere Schwarzwassertal und die Westabdachung des Plateaus genauer untersucht (HUTH, 1998; SINREICH, 1998; TOMSU, 1998). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den genannten Diplomarbeiten und bei GOLDSCHEIDER (1998a, 1998b) dargestellt.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 1: Blick von der Gottesackerscharte auf Gottesacker und Hohen Ifen. Nahezu die gesamte Oberfläche dieses Karstplateaus wird von Schrattenkalk gebildet. Gottesacker und Hoher Ifen gehören zum System der helvetischen Decken, das Walmendinger Horn (links hinten) zu den penninischen und der mächtige Widderstein (ganz hinten) zu den ostalpinen Decken

2. Geologie

2.1 Geologischer Rahmen

Überblick

Hoher Ifen und Gottesacker liegen am Alpennordrand im Grenzbereich der Allgäuer und Vorarlberger Alpen. Dies ist geologisch ein besonders vielfältiger Bereich, da dort alle wichtigen Baueinheiten der Alpen auf engstem Raum nebeneinander anzutreffen sind: die Molasse, die helvetischen Decken (Helvetikum), die penninischen Decken (Penninikum) und die ostalpinen Decken (Ostalpin oder Kalkalpin). Diese Einheiten wurden in benachbarten Ablagerungsräumen gebildet, während der Gebirgsbildung von Süden nach Norden abgeschert, mehr oder weniger weit transportiert und als Decken übereinandergeschoben. Gesteinseinheiten, die ursprünglich *nebeneinander* gebildet wurden, liegen also heute in den Alpen *übereinander*, wobei die Einheiten, die am weitesten im Süden gebildet wurden, im Deckengebäude der Alpen am höchsten liegen.

Die Molasse

Der Molassetrog ist ein etwa 3000 m tiefes Vorlandbecken, das den Abtragungsschutt der Alpen enthält. Es erstreckt sich vom Genfer See über das Schweizer Mittelland bis zum österreichisch-bayerischen Alpenvorland und bildete sich vom Eozän bis zum Miozän (ca. 50 bis 5 Millionen Jahren vor heute). Der südliche Teil des Molassetroges wurde gegen Ende der alpinen Gebirgsbildung gefaltet

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
und überschoben und baut in den Allgäuer Alpen die Berge der Nagelfluh-Kette auf.

Das Helvetikum

Das Helvetikum besteht v.a. aus Sedimentgesteinen des Mesozoikum und Alttertiärs, die in einem flachen und tropisch-warmen Meer auf dem Kontinentalschelf im Süden Europas abgelagert wurden. Es liegt heute im Deckenstapel der Alpen unter Penninikum und Ostalpin, wurde aber einige km nach Norden über den Molassetrog geschoben. Das Helvetikum baut große Teile der nördlichen Schweizer Alpen und der Vorarlberger Alpen auf. Das Gottesackergebiet gehört zur Säntis-Decke, der größten Teildecke des Helvetikums.

Das Penninikum

Über dem Helvetikum folgt das Penninikum. Zum Penninikum gehört u.a. auch der Rhenodanubische Flysch. Er bildete sich während der Kreidezeit und dem Alttertiär in Tiefseetrögen südlich des helvetischen Ablagerungsraumes (EISBACHER, 1991). Der Flysch besteht häufig aus monotonen, fossilarmen und tonreichen Sandsteinen. Das Penninikum wurde während der alpinen Gebirgsbildung als Decke über das Helvetikum geschoben. Große Teile der Walliser Alpen gehören zum Penninikum. Im Kleinwalsertal bildet der Flysch die begrünte, unter 2000 m hohe Bergkette des Walmendinger Horns.

In weiten Teilen von Vorarlberg und im Allgäu ist die Flyschdecke bereits vollständig abgetragen, so daß die darunterliegenden helvetischen Decken freigelegt wurden und heute an der Oberfläche anstehen. Eine solche Erosionsöffnung wird als tektonisches Fenster bezeichnet (RICHTER, 1984). Das Gottesackergebiet liegt am Ostrand dieses tektonischen Fensters und stellt eine schildförmige Aufwölbung der helvetischen Decken dar, die WAGNER (1950) als „Kreideschild" bezeichnet. Entlang von Breitach und Schwarzwasserbach taucht das Helvetikum in östlicher Richtung unter die penninischen Flyschdecken ab (s. *Abb. 2*). Das Schwarzwassertal bildet also genau die Grenze zwischen helvetischen Decken und penninischem Flysch: Die orographisch rechte Talseite wird von Flyschbergen gebildet, das Helvetikum steht auf der orographisch linken Talseite an. Dies macht das Schwarzwassertal sowohl geologisch als auch hydrogeologisch zu einem äußerst interessanten Gebiet.

Das Ostalpin

Die ostalpinen Decken sind die höchste Baueinheit der Alpen. Sie wurden am weitesten im Süden gebildet, am weitesten über die anderen Decken geschoben und liegen heute im Deckenstapel der Alpen am höchsten. Sie bestehen aus Sedimentgesteinen, die auf dem Nordrand der Afrikanischen Platte abgelagert wurden. Im Allgäu und im Kleinwalsertal baut der bis zu 1000 m mächtige Hauptdolomit aus der Triaszeit die markanten und schroffen Berge des Hauptkammes auf, wie beispielsweise den über 2500 m hohen Widderstein (SCHOLZ, 1995).

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

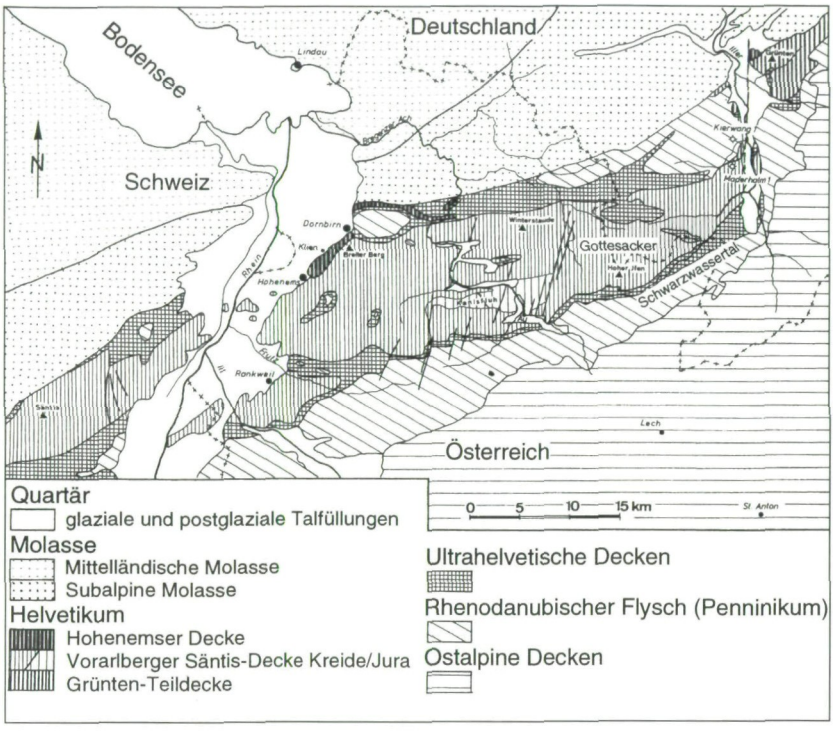


Abb. 2: Geologisch-tektonische Übersichtskarte der Allgäuer und Vorarlberger Alpen. Molasse, Flysch, Helvetikum und Ostalpin sind hier auf engstem Raum nebeneinander anzutreffen. Das Helvetikum bildet ein großes tektonisches Halbfenster inmitten der Flyschdecken, die es im Norden, Osten und Süden umgeben. Der Gottesacker liegt am Ostrand dieses Halbfensters, entlang des Schwarzwassertales taucht das Helvetikum unter die Flyschzone ab (WYSSLING, 1986)

2.2 Stratigraphie

Überblick

Die im Untersuchungsgebiet anstehenden Gesteine sind Sedimentgesteine aus der Kreidezeit (Hauterive bis Campan). Das älteste aufgeschlossene Gestein ist der Kieselkalk. Darüber folgen Drusbergschichten, Schrattenkalk, Glaukonitsandstein und Leistmergel. Der Kieselkalk steht nur in der äußersten Nordwestecke des Untersuchungsgebietes an, spielt für die Hydrogeologie keine Rolle und wird hier daher nicht beschrieben. Besonders in Tallagen sind auch quartäre Sedimente sowie eine bedeutende Bergsturzmasse anzutreffen.

Die Drusbergschichten

Die Drusbergschichten sind eine gleichmäßig gebankte Folge von bräunlichen, fossilarmen Tonsteinen, Mergeln und einzelnen Kalkbänken. Ihre Mächtigkeit nimmt von Norden nach Süden auf maximal 250 m zu. Der eindrucksvollste Aufschluß der Drusbergschichten ist das Tal des Tiefen Ifen, wo die gesamte Abfolge von Kieselkalk, Drusbergschichten und Schrattenkalk studiert werden kann. Besonders im Süden des Untersuchungsgebietes nimmt in den oberen Drusbergschichten die Zahl und Mächtigkeit der eingeschalteten Kalkbänke nach oben zu, bis schließlich Schrattenkalk ansteht. Der Übergang zwischen beiden Gesteinen ist also fließend. Im Norden des Untersuchungsgebietes ist die Grenze schärfer ausgebildet.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Der Schrattenkalk

Dieser Kalkstein ist im Süden des Kartiergebietes 125 m mächtig, im Norden nimmt die Mächtigkeit auf ca. 75 m ab (ZACHER, 1973). Er ist äußerst tonarm und spröde und besteht zum größten Teil aus Fossilschutt. An einigen Stellen konnten sich kleine Riffe bilden, die nur wenige Meter mächtig sind und einen Durchmesser von bis zu 100 m haben. Nach Süden nimmt die Korngröße des Fossilschuttes allmählich ab, währen die Gehalte an Ton und Quarz zunehmen (SCHOLZ, 1995). Der Schrattenkalk ist das wichtigste Gestein des Untersuchungsgebietes. Er bildet fast die gesamte Oberfläche des Gottesackers und die Gipfelplatte des Hohen-Ifen. Auch Torkopf und Mitteleck bestehen aus Schrattenkalk, ebenso die Schluchten des Schwarzwasserbaches und die Breitachklamm.

Der Glaukonitsandstein (= Garschella-Formation)

Über dem Schrattenkalk liegt die bis zu 50 m mächtige Schichtfolge der Garschella-Formation, die überwiegend aus glaukonitführenden Quarzsandsteinen besteht und hier vereinfacht als Glaukonitsandstein zusammengefaßt wird (RICHTER, 1984). Es handelt sich meist um dickbankige, harte Sandsteine mit kieseligem oder kalkigem Bindemittel. Im frischen Zustand sind diese Sandsteine grünlich, da sie das eisenhaltige Mineral Glaukonit führen. Bei der Verwitterung wird das Eisen oxidiert, so daß eine bräunliche Farbe entsteht. Auf dem Gottesacker haben sich einzelne Reste von Grünsandstein erhalten, die durch säureliebende Vegetation und höhere Feuchtigkeit auffallen.

Die Leistmergel der Amdener Schichten

Die jüngsten helvetischen Gesteine, die im Kartiergebiet anstehen, sind die Leistmergel der Amdener Schichten, die eine Mächtigkeit von bis zu 250 m erreichen. Sie bestehen aus einer monotonen Abfolge von teils sandigen Mergeln und Tonsteinen mit wenigen, geringmächtigen Kalklagen (SCHOLZ 1995). Im frischen Zustand sind die Leistmergel grau, verwittern jedoch bräunlich. Entlang von Schichtfugen, Schieferungsflächen und Klüften, zerfallen sie zu leistenförmigen Stengeln, was ihnen ihren Namen gegeben hat.

Quartäre Sedimente

Der Talboden des Schwarzwassertals ist weitflächig von eiszeitlichen Grundmoränen bedeckt, in die lokal kalkreiche Seetone eingeschaltet sind. Kare, Hänge am Fuß von Felswänden und die Talböden der Hochtäler sind häufig mit Hangschutt bedeckt. In manchen Abschnitten des Schwarzwassertales fand im Holozän Sedimentation statt, so daß junge Talböden entstanden. Die zahlreichen Moore haben sich auf den unterschiedlichsten Substraten entwickelt und sind u.a. bei BROGGI (1987) beschrieben.

Der Bergsturz im oberen Schwarzwassertal

Eine der interessantesten Bildungen des Quartärs ist der nacheiszeitliche Bergsturz im oberen Schwarzwassertal, der sich von der aus Schrattenkalk bestehenden Gipfelplatte des Hohen Ifen gelöst hat. WAGNER (1950) schätzt das

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Volumen der Bergsturzmasse auf 8 Millionen m^3. Sie enthält bis zu hausgroßen Blöcken aus Schrattenkalk. Durch den Bergsturz wurde ein heute verlandeter See, die Ebene Melköde-Galtöde aufgestaut. Der Bergsturz liegt auf Grundmoräne, ereignete sich also *nach* der Würmeiszeit, aber *vor* Beginn der historischen Überlieferung (SCHMIDT-THOMÉ, 1974).

2.3 Tektonik

Falten

Während einer Gebirgsbildung werden ursprünglich ebene Gesteinsschichten seitlich eingeengt und dadurch gefaltet. Der nach oben gebogene, konvexe Teil einer Falte wird als Antiklinale, Sattel oder Gewölbe bezeichnet, der nach unten gebogene, konkave Teil heißt Synklinale oder Mulde.

Die helvetische Kreide ist stark gefaltet. Insbesondere der Schrattenkalk bildet weitgespannte, regelmäßige Großfalten, die jedoch häufig nicht durch ein Umbiegen der Schichten sondern durch Brüche geformt sind (KRIEG, 1969). Die Faltenachsen der Säntis-Decke verlaufen in etwa Ost-West. Im Untersuchungsgebiet, welches am Ostrand der Säntis-Decke liegt, streichen sie jedoch in Richtung WNW-ESE. Ganz im Osten biegen sie sogar in NW-SE-Richtung um und tauchen entlang der Breitach und des Schwarzwasserbaches in südöstlicher Richtung unter die Flyschdecke ab.

Die Falten lassen sich im Gelände oder auf einer topographischen Karte leicht erkennen, da eine weitgehende Übereinstimmung zwischen geologischen Strukturen und Geländeformen besteht: Antiklinalen bilden meist Bergrücken, während Täler mit Synklinalen zusammenfallen. Es gibt aber auch Fälle von Reliefumkehr, in denen der Scheitel eines Schrattenkalk-Gewölbes aufgebrochen ist, und die Erosion die darunterliegenden, älteren Schichten in Form eines Tales freigelegt hat.

WAGNER (1950) beschreibt im Helvetikum westlich der Iller 11 Faltenzüge. Im Untersuchungsgebiet liegen 4 Antiklinalen und 3 Synklinalen, die von Norden nach Süden beschrieben werden (s. *Abb. 3 u. 4*)

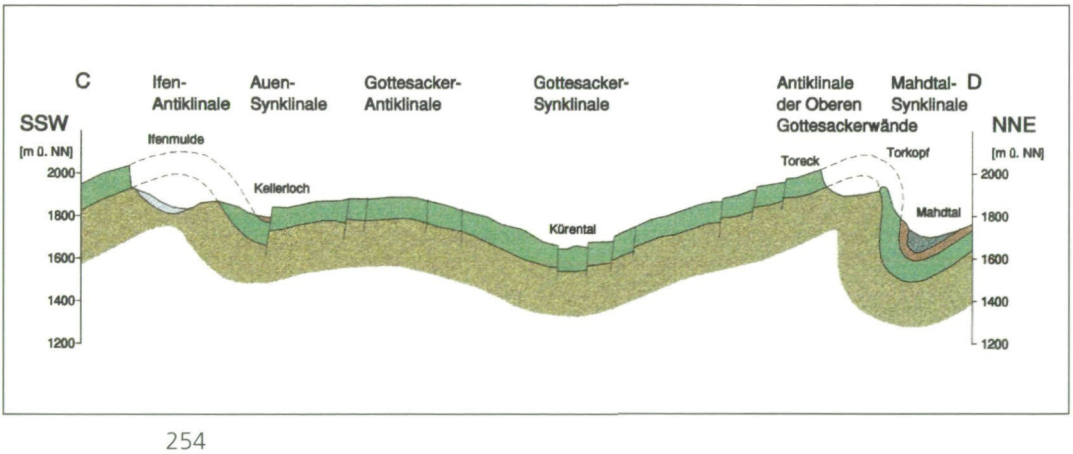


Abb. 3: Geologisches Profil vom Hohen Ifen über den Gottesacker zum Mahdtal. Entlang der Ifen-Antiklinale ist der Schrattenkalk aufgebrochen und muldenförmig ausgeräumt, dort befindet sich die Ifenmulde. Auch zwischen Toreck und Torkopf wurde der Schrattenkalk abgetragen. Die gesamte Oberfläche des Gottesackers wird von Schrattenkalk aufgebaut. Hellbraun: Drusbergschichten, grün: Schrattenkalk, braun: Glaukonitsandstein, oliv: Leistmergel, hellblau: Quartär. Profil erstellt mit ARC/INFO 7.0.4, (GOLDSCHEIDER, 1997)

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

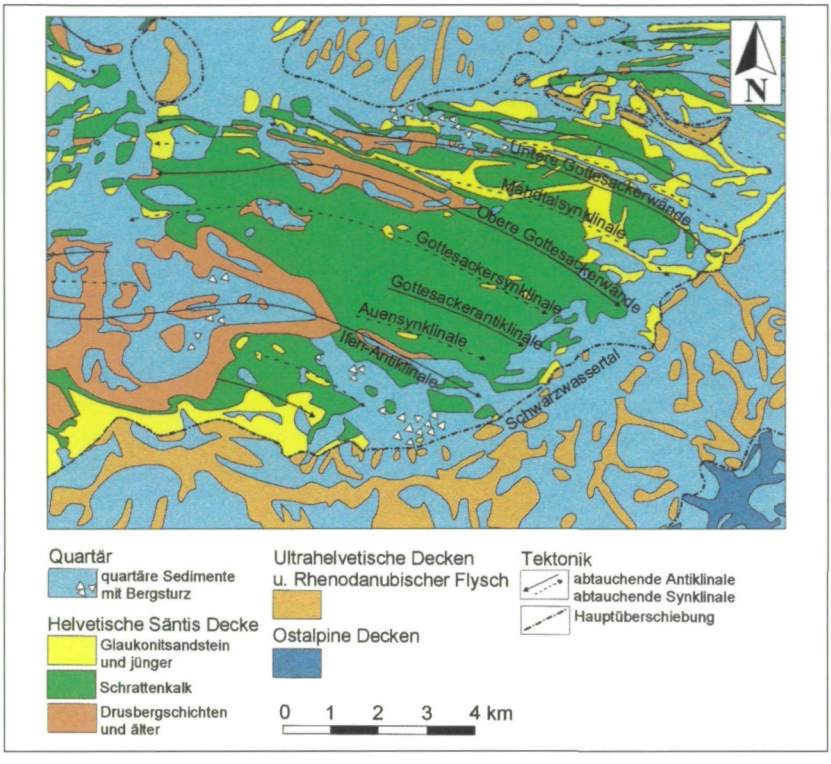


Abb. 4: Vereinfachte Geologische Karte des Gottesackergebietes mit der Lage der abtauchenden Faltenachsen. Nahezu die gesamte Oberfläche des Gottesackers wird von Schrattenkalk aufgebaut, entlang des Schwarzwassertales taucht er unter das Talniveau ab (verändert, nach ZACHER, 1985)

Die Antiklinale der Unteren Gottesackerwände bildet die Unteren Gottesackerwände und den Kühberg. Bei Außerschwende durchschneidet die Breitach im Bereich des Scheitels der hier abtauchenden Antiklinale gerade eben noch den Schrattenkalk. Dort befindet sich eine neu entdeckte Grundquelle, die den tiefsten Auslaß des Karstsystems darstellt.

Das Mahdtal folgt der Mahdtalsynklinale. Von der Mahdtal-Alp über das Hölloch bis zur Höfle-Alp verläuft die Synklinale ganz im Schrattenkalk. Im untersten Mahdtal und Schwarzwassertal wird der verkarstete Schrattenkalk von jüngeren Gesteinsschichten, also von Glaukonitsandstein und Leistmergeln bedeckt.

Die Antiklinale der Oberen Gottesackerwände baut die Oberen Gottesackerwände, Mitteleck, Torkopf und Sonnenberg auf. Sie taucht in Richtung ESE unter das Schwarzwassertal ab. Der Schwarzwasserbach hat hier eine Schlucht in den Schrattenkalk eingeschnitten. Dort befinden sich auch drei wichtige Karstquellen: die Aubachquelle, die Bürgermeisterquelle und die kleine Karstquelle bei Kesselschwand.

Die Gottesackersynklinale ist mit einer Länge von 80 km die größte Synklinale des Helvetikums (WAGNER, 1950). Sie bildet die direkte Fortsetzung der Wildhauser Synklinale, welche westlich des Rheintals das Säntismassiv von der Churfirsten-Gruppe trennt. Im Gottesackergebiet bildet sie das Löwental, erreicht bei der ehemaligen Gottesacker-Alp ihre Kulmination, um dann entlang des Kürentales nach SE unter das Schwarzwassertal abzutauchen.

Die Gottesackerantiklinale baut den südlichen Teil des Gottesackers auf und taucht im Schwarzwassertal in südöstlicher Richtung ab. Der Schwarzwasserbach

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
fließt hier in einer Schlucht aus Schrattenkalk, in der sich eine Estavelle befindet, die in der Hydrogeologie des Schwarzwassertales eine wichtige Rolle spielt.

Die Auensynklinale bildet morphologisch ein markantes Trockental, das sogenannte Kellerloch. Der Schrattenkalk der Gottesackerantiklinale fällt nach Süden zum Kellerloch mit einer 40-60 m hohen, senkrechten, tektonisch bedingten Bruchstufe ab.

Die Ifen-Antiklinale zieht sich über das Tal des Tiefen Ifen und die Ifenmulde bis ins Schwarzwassertal, wo sie im Bereich der Auenhütte abtaucht. Die Ifen-Antiklinale ist ein Paradebeispiel von Reliefumkehr (SCHMIDT-THOMÉ, 1960): Im Scheitel der Antiklinalen wurde der Schrattenkalk abgetragen, so daß heute in den muldenförmig ausgeräumten Längstälern des Tiefen Ifen und der Ifenmulde die älteren Schichten anstehen. In der Ifenmulde sind Drusbergschichten aufgeschlossen und teilweise mit Hangschutt und Moräne bedeckt. Die markante Gipfelplatte des Hohen Ifen besteht aus Schrattenkalk und ist ein Überrest des Südschenkels der Ifen-Antiklinale.

Störungen und Klüfte

Der Schrattenkalk wird auf dem Gottesacker von einem engständigen Netz von Störungen und Klüften durchzogen. Im Gelände fallen Störungen oft als markante Bruchstufen auf oder werden durch Karstgassen nachgezeichnet. Die Störungen sind zwar ausgesprochen zahlreich, ihr Versatz ist aber meist gering. Zwei Systeme von Störungen sind dominierend: Nordost-Störungen und Nordwest-Störungen (WAGNER, 1950; CRAMER, 1959). Die ungewöhnlich starke tektonische Zerrüttung des Schrattenkalks ist eine Ursache für das extreme Ausmaß seiner Verkarstung.

3. Karstmorphologie

3.1 Begriffsdefinitionen

Als verkarstungsfähig werden alle Gesteine bezeichnet, die anfällig für Lösungsvorgänge sind. Die typischsten Karstlandschaften entwickeln sich aus Kalkstein (JENNINGS, 1985). Dort ist die Kohlensäure-Verwitterung wirksam (SONTHEIMER et. al., 1986):

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 = Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

Das im Wasser gelöste Kohlendioxid kann entweder aus der Luft oder aus der Bodenatmung stammen. Auch organische Säuren können Kalk lösen und daher zur Verkarstung beitragen. Die Kalklösung setzt bevorzugt entlang von wasserwegsamen Trennflächen an.

Nach den Formen in Kalksteingebirgen des slowenisch-kroatischen Karstes werden alle ähnlichen Phänomene als Karst bezeichnet. Alle durch Lösungsvorgänge entstandenen Karstformen werden als primäre Karst-Erscheinungen bezeichnet. Ausscheidungen von neu gebildetem Kalkstein aus Karstwässsern werden als sekundäre Karst-Erscheinungen zusammengefaßt (RICHTER, 1992). Bekannte sekundäre Karst-Erscheinungen sind Tropfsteinhöhlen und

Sinterterrassen. Im Untersuchungsgebiet dominieren die primären Karst-Erscheinungen bei weitem.

©Naturhistorisches Museum Wien, download unter www.biologiezentrum.at

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen nacktem Karst und Grünkarst. Im nackten Karst steht das verkarstungsfähige Gestein direkt an der Geländeoberfläche an. Dort wirkt vor allem das rasch abfließende, kohlensäurehaltige Niederschlagswasser kalkagressiv. Es entstehen meist scharfkantige, schroffe Karstformen. Im Grünkarst ist der Kalkstein mit Boden und Vegetation bedeckt. Das langsam zirkulierende Bodenwasser enthält CO_2 und organische Säuren, die den Kalkstein allseitig auflösen, so daß eher rundliche Formen entstehen.

3.2 Karstformen

Karren und Karrengassen

Karren oder Schratten sind oberflächliche, rinnen-, rillen- oder napfförmige Lösungshohlformen, die durch oberflächlichen Abfluß von Niederschlags- und Schmelzwässern oder unter Mitwirkung der Boden- und Vegetationsdecke entstehen (WILHELMY, 1992). Karren sind die dominierende oberflächliche Karstform des Gottesackers (SCHMIDT-THOMÉ, 1960). Meist zeichnen sie das Kluftnetz nach und werden daher als Kluftkarren bezeichnet.

Es gibt nur wenige Gebiete, in denen Karren in solcher Formenvielfalt und Verbreitung beobachtet werden können, wie auf dem Gottesacker. Nahezu das gesamte Plateau ist ein einziges Karrenfeld (ECKERT, 1902). Aber auch im Kürenwald sind überall Karrenfelder vorhanden, die meist von einer geringmächtigen Humusauflage bedeckt sind. Vegetationsfreie Rundkarrenfelder finden sich an vielen Stellen. Sie sind ein Beleg für junge Bodenerosion, da sie nur unter Bodenbedeckung entstanden sein können (CRAMER, 1959).

Abb. 5: Rundkarrenfeld in der Krummholzstufe. Die Karren zeichnen das Kluftnetz nach und werden daher als Kluftkarren bezeichnet. Aufgrund ihrer rundlichen Form können sie nur unter Boden- und Vegetationsbedeckung entstanden und durch Bodenerosion freigelegt worden sein

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
In der Nähe von Störungen ist der Schrattenkalk intensiv geklüftet und zerrüttet. Daher kann dort die Verkarstung besonders tiefgreifend wirken, so daß viele Meter tiefe und breite Karren- oder Karstgassen entstehen. Sie lassen sich oft über hunderte von Metern verfolgen und zeichnen das Störungsmuster nach.

Dolinen und Naturschächte

Dolinen sind trichter- oder schachtförmige Karsthohlformen mit unterirdischem Abfluß (WILHELMY, 1992). Eine Doline, die als Schluckloch für ein Oberflächengewässser dient, wird als Ponordoline bezeichnet. Im Schwarzwassertal gibt es einige Ponordolinen, beispielsweise die Ponordoline am Geißbühl, die beim kombinierten Markierungsversuch als Eingabestelle diente. Auf dem Gottesacker sind v.a. Naturschächte außerordentlich häufig. Sie haben meist einen rundlichen Querschnitt und sind oft 5-10 m tief, können aber auch erheblich tiefer sein. Entlang von Störungen liegt oft Naturschacht neben Naturschacht. Karstspalten haben im Gegensatz zu Naturschächten einen spaltenförmigen Querschnitt. Sie können ebenfalls viele Meter tief sein und sind im Untersuchungsgebiet extrem häufig.

Höhlen

Höhlen sind natürliche, unterirdische und befahrbare Hohlräume (WILHELMY, 1992). Sie sind besonders in Karstgebieten verbreitet. Eine der größten Höhlen der Alpen, das Hölloch im Schweizer Muotatal, hat sich im Schrattenkalk gebildet. Auch das Gottesackergebiet ist reich an Höhlen (NIGGEMANN, 1997). Die Sohle zahlreicher Höhlen im Schrattenkalk wird von den Drusbergschichten gebildet, es handelt sich also um Gesteinsgrenzhöhlen, wie beispielsweise das Schneckenloch bei Schönebach (TRIMMEL, 1955). Andere Höhlen, wie die Rubachhöhle verlaufen innerhalb der Wechsellagerungen zwischen Drusbergschichten und Schrattenkalk (KRIEG, 1969).

4. Hydrogeologie

4.1 Allgemeines zur Hydrogeologie von Karstgebieten

Nach MATTHESS & UBELL, 1983; WHITE, 1988; FORD & WILLIAMS, 1989; HÖTZL, 1992; COST, 1995 und HÖTZL, 1996.

Karstgrundwasserleiter und Karstquellen

Aus einem verkarstungsfähigen Gestein (meist Kalkstein) kann sich durch korrosive Erweiterung der Schichtfugen, Klüften und Störungen ein System von mehr oder weniger zusammenhängenden Karstspalten, Karströhren, Karstschläuchen und Höhlen entwickeln, welches auch als Karstnetzwerk bezeichnet wird. Aus einem geklüfteten Karbonatgestein wird so ein Karstgrundwasserleiter. Dabei gibt es alle Übergänge zwischen einem ausschließlich geklüfteten und einem vollständig verkarsteten Karbonatgestein.

Karstgrundwasserleiter sind durch hohe Fließgeschwindigkeiten, entsprechend kurze Verweilzeiten des Grundwassers und rasche Reaktionen auf Niederschläge

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
und Schneeschmelze charakterisiert. Daher zeichnen sich Karstquellen meist durch stark schwankende Schüttungen aus. Nach ihrer Schüttung unterscheidet man drei Typen von Karstquellen: Perennierende Quellen führen immer Wasser, intermittierende Quellen fallen gelegentlich trocken während ephemerische Quellen nur nach starken Niederschlägen kurzzeitig Grundwasser fördern.

Karstgrundwasserleiter sind häufig über große Gebiete miteinander verbunden und bilden zusammenhängende Karstgrundwasser-Landschaften. Karstgebiete werden nach hydrogeologischen Kriterien in verschiedene Zonen unterteilt:

Seichter und tiefer Karst

Nach der Lage der Verkarstungsbasis (undurchlässige Sohlschicht oder Liegendstauer) zum Vorfluter kann ein Karstgebiet in seichten und tiefen Karst gegliedert werden: Im seichten Karst liegt die Verkarstungsbasis oberhalb des Vorflutniveaus. Daher kann der seichte Karst in langen Trockenzeiten weitgehend leerlaufen. Karstquellen, die vom seichten Karst alimentiert werden, weisen daher starke Schüttungsschwankungen auf. Häufig sind sie auch intermittierend oder ephemerisch und werden daher als „Hungerquellen" bezeichnet. Im tiefen Karst liegt die Verkarstungsbasis unterhalb des Vorflutniveaus. Der tiefe Karst läuft daher auch in langen Trockenzeiten nicht leer. Karstquellen, die ihr Wasser aus dem tiefen Karst erhalten, sind in der Regel perennierend und haben meist geringe Schüttungsschwankungen.

Offener und bedeckter Karst

Karstgebiete können auch in eine offene und eine überdeckte Zone unterteilt werden: In der offenen Zone steht das verkarstete Gestein direkt an der Oberfläche an (nackter Karst) oder wird von einer geringmächtigen Bodendecke überlagert (Grünkarst). Niederschläge, Oberflächengewässer und Schmelzwässer können in der offenen Zone sehr leicht in den Karstgrundwasserleiter infiltrieren. Daher ist das oberirdische Gewässernetz meist nur sehr spärlich ausgebidet oder fehlt vollständig, die Entwässerung erfolgt überwiegend unterirdisch. In der überdeckten Zone ist der Karstgrundwasserleiter von nicht verkarsteten Gesteinen überlagert. Daher kann hier ein oberirdisches Gewässernetz vorhanden sein.

Freies, gespanntes und artesisch gespanntes Karstgrundwasser

Karstlandschaften lassen sich auch nach der Lage des Karstwasserspiegels unterteilen: In der Zone freien Grundwassers liegt der Karstwasserspiegel innerhalb des Karstgrundwasserleiters. Hier kann das Karstgrundwasser häufig druckfrei in Höhlenbächen fließen. Von gespanntem Grundwasser spricht man, wenn die Grundwasserdruckfläche oberhalb der Grundwasseroberfläche liegt. Gespanntes Karstgrundwasser kann also nur in der überdeckten Zone auftreten, wenn der Karstgrundwasserleiter von gering durchlässigen Schichten (= Hangendstauer) überlagert wird. In der Zone gespannten Grundwassers bewegt sich das Karstgrundwasser durch druckhaftes Fließen, ähnlich wie in Wasserleitungen.

Artesisch gespanntes Grundwasser liegt dann vor, wenn die Grundwasserdruckfläche oberhalb der Geländeoberfläche liegt. Wenn man ein artesisches System anbohrt und auf eine wasserführende Zone trifft, so sprudelt das

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
Grundwasser wie ein Springbrunnen an die Oberfläche. Ein typisch artesisches System ist beispielsweise realisiert, wenn ein Karstgrundwasserleiter aus einem höher gelegenen Gebiet unter undurchlässige Schichten abtaucht oder in einer Muldenstruktur von undurchlässigen Schichten bedeckt ist.

Wenn sich ein Karstgebiet hebt oder die Vorfluter durch Erosion tiefergelegt werden, muß sich auch die unterirdische Entwässerung auf dieses absinkende Vorflutniveau einstellen: Höher gelegene Quellen fallen trocken, stattdessen entstehen neue, tiefer gelegene Quellen, deren Schüttung meist annährend konstant aber relativ gering ist, da die Wasserwegsamkeiten sich erst noch entwickeln müssen.

4.2 Hydrogeologische Charakterisierung der Gesteine

Die Drusbergschichten und ihre Funktion als Liegendstauer

Die tonig-mergeligen Drusbergschichten besitzen eine geringe Durchlässigkeit und dichten daher den aus Schrattenkalk gebildeten Karstgrundwasserleiter nach unten ab. Sie übernehmen also die Rolle des Liegendstauers. Vermutlich verlaufen viele unterirdische Karstgerinne an der Basis des Schrattenkalks auf Drusbergschichten oder innerhalb der Wechsellagerungen zwischen beiden Einheiten.

Der aus Schrattenkalk gebildete Karstgrundwasserleiter

Die starke tektonische Beanspruchung und die Reinheit, also der geringe Ton- und Schluffgehalt des Schrattenkalks führten zu seiner extrem starken Verkarstung. Ein reicher Formenschatz oberflächlicher Karstformen ist flächendeckend entwickelt, was die Infiltration von Niederschlägen stark erleichtert. Der gesamte Gottesacker ist daher oberflächlich abflußlos, die Entwässerung ist vollständig in den Untergrund verlegt. Im Schrattenkalk existieren zahlreiche Höhlen und ein Netzwerk von Karströhren und Karstspalten, die zumeist tektonischen und sedimentären Trennflächen folgen. Der Schrattenkalk bildet daher einen zusammenhängenden Karstgrundwasserleiter, der u.a. durch extrem hohe Fließgeschwindigkeiten charakterisiert ist.

Glaukonitsandstein und Leistmergel und ihre Funktion als Hangendstauer

Aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit sind die wasserstauenden Glaukonitsandsteine und Leistmergel Grundwassernichtleiter. Dort, wo sie vorhanden sind, dichten sie daher den Schrattenkalk nach oben ab, übernehmen also die Funktion eines Hangendstauers über dem Karstgrundwasserleiter. Bei geringen Hangneigungen haben sich auf Leistmergel und Glaukonitsandstein häufig Moore und Feuchtgebiete entwickelt. In Gebieten mit anstehenden Leistmergeln erfolgt die Entwässerung ausschließlich oberirdisch. Die dabei entstehenden Erosionsrinnen sind meist reich verzweigt und haben einen V-förmigen Querschnitt.

Im untersten Mahdtal und Schwarzwassertal ist der aus Schrattenkalk gebildete Karstgrundwasserleiter im Kern der abtauchenden Mahdtalsynklinale von Glaukonitsandstein und undurchlässigen Leistmergeln überlagert und nach oben abgedichtet. Dies ist die typische Geometrie eines artesischen Systems. Dort, wo

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

dieses artesische System durchbrochen ist und der Schrattenkalk die Oberfläche erreicht, befinden sich perennierende Karstquellen, an denen das Grundwasser vermutlich unter Druck ausfließt.

Hydrogeologie des Quartärs im Schwarzwassertal

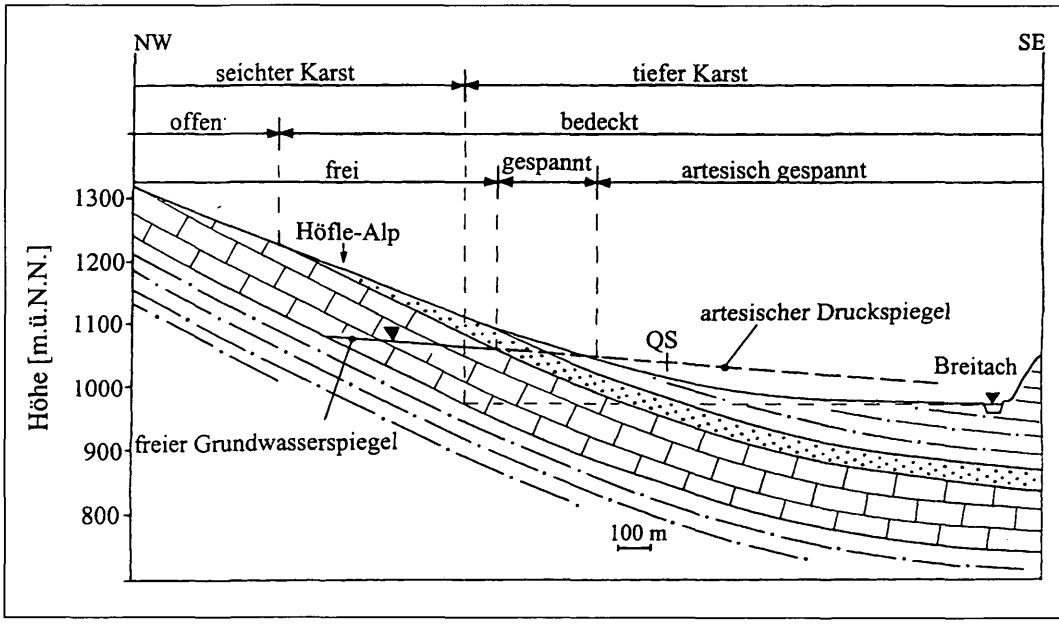
Der Talboden des Schwarzwassertals ist über weite Bereiche mit Moränenmaterial bedeckt. Auch ist die oberflächliche Entwässerung nur spärlich entwickelt. Es gibt dort nur wenige, kleine Grundwasseraustritte, deren Wasser aber meist nach kurzem Fließweg versickert, ohne den Schwarzwasserbach zu erreichen. Ein Großteil des infiltrierenden Niederschlagswassers durchsickert offensichtlich die gut durchlässigen pleistozänen Deckschichten und gelangt in den Karstgrundwasserleiter, der im gesamten Schwarzwassertal im Untergrund vorhanden ist. Auch der Schwarzwasserbach verliert über weite Strecken Wasser, das die ungesättigte Zone durchsickert und schließlich in den Karst gelangt.

Bei extremem Hochwasser können sich die geschilderten Verhältnisse umkehren: Der Karstwasserspiegel steigt dann sehr schnell an, so daß die Grundwasserdruckfläche kurzzeitig oberhalb der Geländeoberfläche liegen kann. Nach Angaben von Einheimischen entstehen dann zahlreiche Quellen im Moränengelände und „überall spritzt das Wasser aus dem Boden".

4.3 Hydrogeologische Gliederung des Untersuchungsgebietes

Die beschriebene Gliederung von Karstgebieten in eine offene und eine bedeckte Zone, in seichten und tiefen Karst sowie in Zonen mit freiem, gespanntem und artesisch gespanntem Grundwasser ist auch im Untersuchungsgebiet möglich. In einem Längsprofil durch das Mahdtal und untere Schwarzwassertal bis zur Breitach ist die Abfolge aller Zonen dargestellt (s. *Abb. 6*)

Abb. 6: Schematisches hydrogeologisches Längsprofil durch das Mahdtal und das untere Schwarzwassertal bis zur Breitach, Erläuterung siehe Text



©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
Im größten Teil des Untersuchungsgebiets steht der Schrattenkalk direkt an der Geländeoberfläche an (nackter Karst) oder wird von einer geringmächtigen Bodendecke überlagert (Grünkarst). Das gesamte Gottesackerplateau, der Kürenwald und große Teile des Mahdtals sind also als offene Zone zu bezeichnen.

Im unteren Mahdtal und Schwarzwassertal wird der Karstgrundwasserleiter in der hier abtauchenden Mahdtal-Synklinale vom Hangendstauer (Glaukonitsandstein und Leistmergel) überlagert. Hier liegt demnach bedeckter Karst vor.

Im unteren Schwarzwassertal und entlang der Breitach ist auch mit gespanntem und sogar artesisch gespanntem Grundwasser zu rechnen, während im gesamten übrigen Untersuchungsgebiet freies Grundwasser vorliegt.

Der Plateauabfluß vom Gottesacker folgt den abtauchenden Synklinalen. Im Schwarzwassertal taucht der Schrattenkalk unter die penninischen Flyschdecken ab und bildet einen zusammenhängenden Karstgrundwasserleiter, der die vom Gottesacker abfließenden Karstwässer sammelt und an die Karstquellen im unteren Schwarzwassertal weiterleitet. Der Abfluß im Schwarzwassertal wird hier als Talabfluß bezeichnet.

Die Grenze Drusberschichten-Schrattenkalk stellt die Verkarstungsbasis dar. Wie noch gezeigt werden wird, bildet nicht der Schwarzwasserbach sondern die Breitach den tiefsten Vorfluter des gesamten Karstgebietes. Die höchstgelegenen perennierenden Karstquellen, die Bürgermeister- und die Sägebachquelle, bilden ein höher gelegenes, lokales Vorflutniveau. Daher ist nahezu das gesamte Karstgebiet als seichter Karst zu bezeichnen, also auch das Schwarzwassertal stromaufwärts der Bürgermeisterquelle. Tiefer Karst liegt lediglich stromabwärts der perenierenden Quellen, also im unteren Schwarzwassertal vor.

4.4 Quellen und Gewässernetz

Überblick über die Quellen und das Gewässernetz

Eine detaillierte Beschreibung aller Quellen findet sich bei GOLDSCHEIDER (1997). Hier wird nur ein kurzer Überblick gegeben. Die Quellen und das Gewässernetz sind in *Abb. 19* (Kapitel 6) dargestellt. Hier werden nur diejenigen Quellen mit einer Nummer gekennzeichnet, die in der Hydrogeologie des Gebietes eine wichtige Rolle spielen oder während des kombinierten Markierungsversuches beprobt wurden (z.B. Q10).

Der Plateaubereich des Gottesackers und der Kürenwald sind oberflächlich abflußlos. Es gibt dort keine Quellen und keine Bäche. Es sind lediglich 2 Stellen bekannt, aus denen meist etwas Wasser tröpfelt. Vom Gottesacker führen zwei Trockentäler zum Schwarzwassertal herab: das Kellerloch und das Kürental. Beide sind ganzjährig auf voller Länge oberflächlich abflußlos. Es ist daher anzunehmen, daß bedeutende Systeme von unterirdischen Karstgerinnen den Tiefenlinien dieser Täler folgen.

In der Ifenmulde befindet sich eine Quelle (Q10). Der dort beginnende Bach versickert jedoch nach kurzem Fließweg in Hangschutt und Moränenmaterial, noch bevor er den Endmoränenwall erreicht, der die Ifenmulde

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
abschließt. Unterhalb des Endmoränenwalls liegt eine Quellgruppe (Q11), die zur Wasserversorgung der Ifenhütte genutzt wird.

Zwischen Oberen Gottesackerwänden und Mitteleck stehen die wasserstauenden Drusbergschichten an. Dort existiert eine oberflächliche Entwässerung, die in zwei kleinen Quellgruppen beginnt. Westlich des Torkopfes befindet sich der oberflächlich abflußlose, periodisch wasserführende Torsee, der über zwei Schwinden entwässert. CRAMER (1959) nimmt an, daß der Torsee – trotz seiner Lage westlich der europäischen Hauptwasserscheide Donau-Rhein – nach Osten, also zur Donau hin, entwässert.

Das Mahdtal entwässert überwiegend unterirdisch und ist daher als Trockental zu bezeichnen. Im obersten Mahdtal stehen jedoch die wasserstauenden Leistmergel an. Daher gibt es dort spärlichen oberirdischen Abfluß. Die Karmulde östlich des Torkopfs wird durch eine perennierende Quelle (Q12) entwässert, deren Wasser versickert, noch bevor es den Talboden erreicht. Unterhalb der Mahdtal-Alp liegt direkt in der Tiefenlinie des Tals das 76 m tiefe Hölloch, das den Eingang eines bedeutenden, wasserführenden Höhlensystems darstellt (SCHMIDT-THOMÉ, 1961). Nach Niederschlägen bildet sich ein kleiner Bach, der vollständig im Hölloch versinkt. Im unteren Mahdtal gibt es wieder Oberflächenabfluß, da dort im Kern der Mahdtalsynklinale die wasserstauenden Glaukonitsandsteine und Leistmergel anstehen. Der Mahdtalbach beginnt jedoch nicht in einer Quelle, sondern in einem Moor.

Im Schwarzwassertal taucht der verkarstete Schrattenkalk unter das Flyschgebiet ab. Daher gibt es dort sowohl oberflächlichen Abfluß (Schwarzwasserbach), als auch unterirdische Karstentwässerung, die in vielfältiger Weise miteinander in Verbindung stehen:

Im oberen Schwarzwassertal versinkt der Schwarzwasserbach im Bereich Galtöde an mehreren Schwinden ganzjährig und vollständig in der Bergsturzmasse und tritt unterhalb derselben – zumindest teilweise – wieder aus. Stromabwärts dieser Resurgenz (=Wiederaustritt) des Schwarzwasserbachs (QR), erhält der Bach zahlreiche kleine Zuflüsse vom Flyschgebiet der orographisch *rechten* Talseite, während er (bei Niedrig- und Mittelwasser) bis zum Aubach auf einer Strecke von ca. 4,5 km keine oberirdischen Zuflüsse aus dem Karstgebiet der orographisch *linken* Talseite erhält. Bei Niedrigwasser verliert der Schwarzwasserbach stromabwärts von QR durch diffuse Versickerung im Bachbett ständig Wasser und fällt daher im Winter und in längeren Trockenzeiten völlig trocken. Bei Unterwald versinkt er bei Niedrigwasser vollständig in einer Höhle, der Schwarzwasserhöhle. Bei Hochwasser wird diese Höhle zur Quelle, es handelt sich also um eine Estavelle (QE).

Stromabwärts der Estavelle führt der Schwarzwasserbach daher nur nach ergiebigen Niederschlägen und während der Schneeschmelze Wasser. Etwa 1 km stromabwärts von QE erhält er einen kräftigen Zufluß durch den Aubach, der in der Aubachquelle (QA) entspringt. Der Aubach ist nur ca. 300 m lang. Bei Hochwasser führen Aubach und Schwarzwasserbach jeweils ca. 6 m³ Wasser pro Sekunde. Bei Niedrigwasser fällt der Schwarzwasserbach völlig trocken, während QA noch einige hundert l/s schüttet. Im Winter fällt auch die Aubachquelle trocken.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 7: Zusammenfluß Aubach (rechts) und Schwarzwasserbach (links). Bei Hochwasser führen beide Bäche etwa 6 m^3 / s

Abb. 8: Die gleiche Stelle bei Niedrigwasser. Der Schwarzwasserbach ist trocken, während der Aubach noch Wasser führt. Das gesamte Wasser aus dem Schwarzwassertal fließt also vollständig im Untergrund und gelangt durch ein Höhlensystem zur Aubachquelle

Die etwa 30 Höhenmeter unterhalb QA gelegene Bürgermeisterquelle (QB) ist der höchste perennierenden Auslaß des Karstsystems. Sie liegt in der Schlucht unterhalb des Zusammenflusses Aubach-Schwarzwasserbach. In dieser Schlucht befindet sich weiter stromabwärts bei Kesselschwand noch eine weitere, kleine Karstquelle (QK). Da der Schwarzwasserbach aus dem oberen Schwarzwassertal und von Zuflüssen der orographisch rechten Talseite gespeist wird und bei Niedrigwasser diffus im Bachbett versickert und in der Estavelle vollständig

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
versinkt, ist es offensichtlich, daß die genannten Karstquellen dann das *gesamte* Schwarzwassertal entwässern.

Bei Innerschwende befindet sich eine weitere perennierende Karstquelle, die Sägebachquelle (QS). Bei Niedrigwasser ist ihre Schüttung höher, als der Abfluß im Schwarzwasserbach. Dies deutet darauf hin, daß die Sägebachquelle nicht nur das Mahdtal entwässert, sondern ein tiefer Auslaß des gesamten Karstgebietes ist.

Der untere Schwarzwasserbach verläuft bis zur Einmündung in die Breitach in den wasserstauenden Leistmergeln. Bei Außerschwende durchschneidet die Breitach die Leistmergel und den Glaukonitsandstein, so daß dort auf einer Strecke von ca. 200 m Schrattenkalk ansteht. Dort konnte eine Grundquelle (QG) nachgewiesen werden, die den tiefsten Auslaß des gesamten Karstsystems darstellt.

Im Talbereich des Schwarzwassertals ist der Karstgrundwasserleiter größtenteils mit Moräne, Hangschutt und sonstigen jungen Sedimenten bedeckt. Dort befinden sich einige kleinere Wasseraustritte, die aus unbedeutenden, lokalen Grundwasservorkommen oder kleinen Feuchtgebieten gespeist werden. Das dort zutage tretende Wasser erreicht meist nicht den Schwarzwasserbach, sondern versickert nach kurzem Fließweg. Oberhalb von Q3 befindet sich das Fuchsloch, eine Höhle, die bei extremem Hochwasser zur Quelle wird.

Im unteren Schwarzwassertal stehen Leistmergel an, die meist von Moräne bedeckt sind. Dort existieren Feuchtgebiete, einige Quellen und ein oberirdisches Entwässerungsnetz.

Die Estavelle im mittleren Schwarzwassertal

Dort, wo die Gottesacker-Antiklinale unter das Schwarzwassertal abtaucht, verläuft der Schwarzwasserbach in einer Schlucht aus Schrattenkalk. Am Fuße der orographisch rechten Schluchtwand befindet sich der Eingang der erwähnten Schwarzwasserhöhle. Bei Niedrigwasser versinkt der Schwarzwasserbach vollständig in dieser Höhle, bei Hochwasser wird sie zur Quelle. Es handelt sich also um eine Estavelle.

Im Zeitraum von Juli bis Oktober 1996 konnte die Estavelle in folgenden Zuständen beobachtet werden:

1) In langen Trockenzeiten fällt der Schwarzwasserbach trocken.

2a) Bei Niedrigwasser führt der Schwarzwasserbach nur wenig Wasser und versinkt vollständig in der Höhle. Nach Regenfällen nimmt der Abfluß im Schwarzwasserbach stark zu, wobei bis zu 450 l / s vollständig in der Estavelle versinken.

2b) Einige Stunden nach Beginn der Niederschläge steigt der Wasserspiegel in der Höhle an, bis sich vor dem Höhleneingang ein Pool (Wasserbecken) bildet. Der Schwarzwasserbach versinkt immer noch vollständig in der Estavelle.

3) Schließlich läuft der Pool über, so daß der Bach nur noch teilweise versickert.

4) Der Schwarzwasserbach kann auch über die Estavelle hinwegfließen, ohne zu versickern. Die Estavelle verhält sich dann neutral.

5) Während der Schneeschmelze oder etwa einen Tag nach einem starken Niederschlagsereignis wird die Estavelle zur Grundquelle und schüttet dann bis zu 3,7 m^3 / s.

©natura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

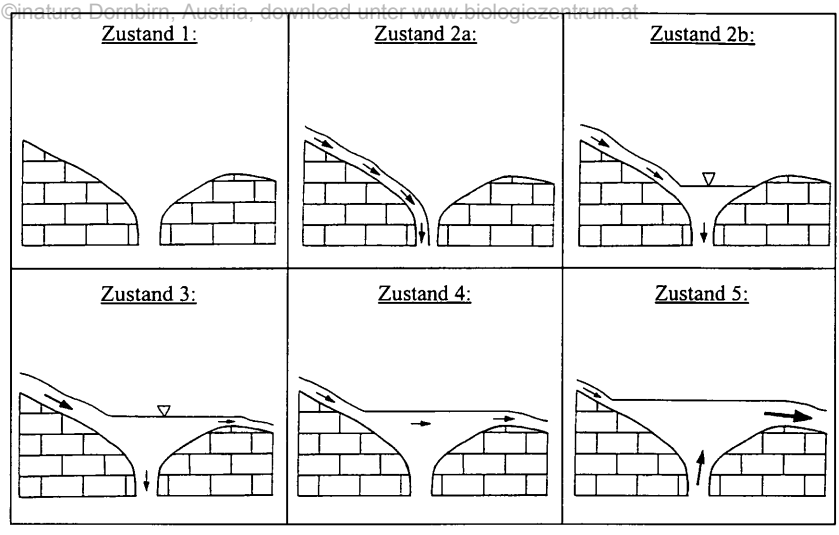


Abb. 9: Beobachtete Zustände der Estavelle: 1) trocken, 2) vollständige Versinkung, a) ohne Pool, b) mit Pool, 3) teilweise Versinkung, 4) neutral, 5) Grundquelle

Vom 21.08.1996 bis zum 31.08.1996 wurde die Estavelle mehrmals täglich beobachtet. Unterhalb, oberhalb und direkt in der Estavelle wurden Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert gemessen und die Abflüsse abgeschätzt (GOLDSCHEIDER, 1997). Im Beobachtungszeitraum gab es zwei ergiebige Niederschlagsereignisse, nach denen die Estavelle zur Grundquelle wurde. In diesem Zustand macht sich der Zustrom von kaltem Karstgrundwasser durch einen Sprung der Temperatur im Schwarzwasserbach bemerkbar. Die höchste Schüttung der Estavelle wurde am 28.08.96 nach starken Regenfällen beobachtet und betrug ca. 3,7 m^3 / s. Im Schwarzwasserbach oberhalb der Estavelle wurde eine Wassertemperatur von 9,6°C gemessen, unterhalb der Estavelle nur noch 6,6°C. Direkt in der Estavelle betrug die Wassertemperatur 5,45°C. Die größte Versinkungsrate wurde am 21.08.96 beobachtet, als der Schwarzwasserbach 2 Stunden nach einem Starkregen mit einem Abfluß von ca. 450 l / s vollständig in der Estavelle verschluckt wurde.

Aus den Beobachtungen geht hervor, daß die Estavelle einen leistungsfähigen Hochwasserüberlauf des Karstsystems darstellt. Da der Schwarzwasserbach oberhalb der Estavelle keine oberirdischen Zuflüsse aus dem Gottesackergebiet erhält, ist anzunehmen, daß das Karstgrundwasser unterirdisch dem Schwarzwassertal zufließt, um in der Aubachquelle und anderen Karstquellen zutage zu treten. Bei Hochwasser ist der unterirdische Karstsammler überlastet, so daß Karstwasser in der Estavelle aufsteigt. Bei Niedrigwasser versinkt der Schwarzwasserbach in der Estavelle und fließt unterirdisch zur Aubachquelle. Dies macht sich auch im Gang der Temperaturen der Aubachquelle bemerkbar:

Die Wassertemperaturen der Aubachquelle und der Estavelle sind umso niedriger, je größer die Schüttung der Estavelle ist (s. *Abb. 10*). Nach starken Niederschlägen erhalten Estavelle und Aubachquelle einen Zustrom von kaltem „Plateauwasser" von der Hochfläche des Gottesackers. Dieses Wasser fließt jedoch schnell ab, so daß zunehmend wärmeres „Talwasser" aus dem Karstgrundwasserleiter des Schwarzwassertales gefördert wird. Die Temperaturen in der Aubachquelle sind jeweils um ca. 0,7°C niedriger, als in der Estavelle, da die Aubachquelle

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

aus dem Kürental zusätzliche Zuflüsse von kaltem „Plateauwasser" erhält. Wenn in der Estavelle das relativ warme Wasser des Schwarzwasserbaches versinkt, steigen in der Aubachquelle die Temperaturen weiter an, sogar über Nacht.

Dies zeigt, daß Estavelle und Aubachquelle verschieden hohe Austritte eines zusammenhängenden Karstsystems sind. Dies wurde durch den kombinierten Markierungsversuch bestätigt. Es ist daher auch anzunehmen, daß das in der Estavelle versinkende Wasser des Schwarzwasserbaches in der Aubachquelle (und vermutlich auch in QB, QK, QS und QG) wieder zutage tritt.

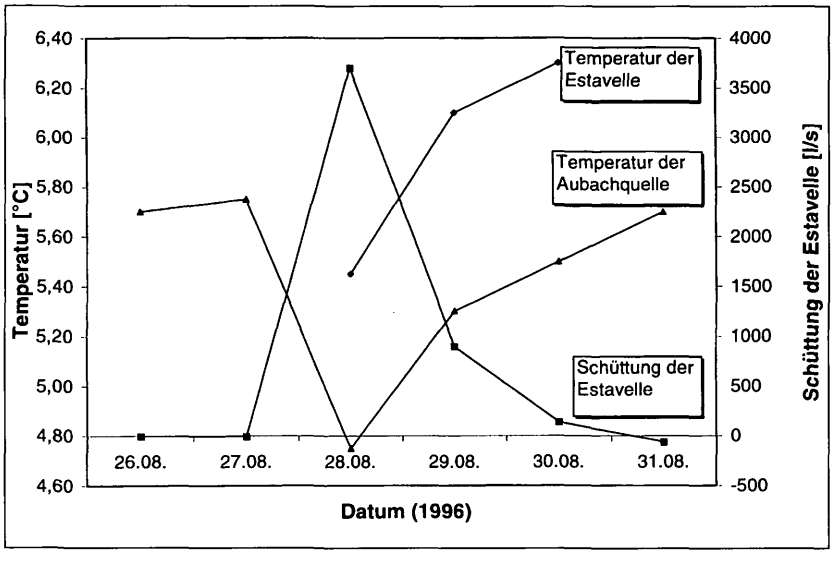


Abb. 10: Zusammenhang zwischen Schüttung und Temperatur der Estavelle und Temperatur der Aubachquelle. Nach starken Niederschlägen fördern Estavelle und Aubachquelle kaltes „Plateauwasser", das aus dem Gottesacker zuströmt. Bei nachlassender Schüttung der Estavelle steigen die Temperaturen der Aubachquelle, da zunehmend warmes „Talwasser" gefördert wird

Die Aubachquelle (QA)

Etwa 1 km stromabwärts der Estavelle erhält der Schwarzwasserbach einen kräftigen Zufluß durch den Aubach, der in der nur etwa 300 m oberhalb gelegenen Aubachquelle entspringt. Sie liegt in einer Schlucht und besteht aus zahlreichen einzelnen Austritten. Je höher die Schüttung ist, umso höher liegt auch die höchste, jeweils aktive Austrittsstelle. Am oberen Ende der Quellschlucht befindet sich die Aubachhöhle, die den höchsten Auslaß der Aubachquelle darstellt. Vermutlich wird durch die Schlucht der freie Karstwasserspiegel angeschnitten, so daß das Grundwasser druckfrei ausfließt. Von Juli bis Oktober 1996 hat QA 60 bis 6000 l / s geschüttet. Bei einer Geländebegehung im Januar 1997 lag QA trocken, es handelt sich also um eine intermittierende Quelle. WAGNER (1950) nimmt an, daß die Aubachquelle lediglich die Gottesackersynklinale (also das Kürental) entwässert. Durch den kombinierten Markierungsversuch vom 20. 09. 1996 konnte jedoch gezeigt werden, daß das Einzugsgebiet der Aubachquelle wesentlich größer ist und bei Niedrigwasser das gesamte Schwarzwassertal stromaufwärts der Quelle umfaßt.

©Naturhistorisches Museum Wien, download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 11 (o.): Der Schwarzwasserbach versinkt vollständig in der Estavelle (ca. 450 l / s)

Abb. 12 (u.): Nach ergiebigen Niederschlägen ist die Estavelle zur Grundquelle geworden und fördert ca. 3,7 m^3 / s

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Die Bürgermeisterquelle (QB)

Diese Karstquelle liegt stromabwärts der Aubachquelle in der Schlucht des Schwarzwasserbaches am Fuß der rechten Schrattenkalkwand. Sie ist gefaßt und versorgte früher das Bürgermeister-Anwesen in Riezlern (CRAMER, 1959). QB ist die höchstgelegene perennierende Karstquelle des Gebietes. Da die etwa 30 m höher gelegene Aubachquelle die Lage des freien Karstwasserspiegels anzeigt, tritt das Wasser an QB vermutlich unter Druck aus. Da sich die Schlucht des Schwarzwasserbaches erst postglazial entwickelt hat und sich noch heute ständig eintieft, ist QB geologisch sehr jung. Die zur Quelle führenden Systeme von Karströhren und Karstschläuchen sind daher noch nicht voll entwickelt, so daß sie nur eine Schüttung von ca. 40 l / s ermöglichen.

Die kleine Karstquelle bei Kesselschwand (QK)

Diese perennierende Quelle liegt auf der orographisch linken Seite der Schlucht des Schwarzwasserbaches und wird für landwirtschaftliche Zwecke genutzt. Trotz ihrer geringen Schüttung von ca. 15 l / s ist sie an der Entwässerung des gesamten Karstsystems beteiligt, wie durch den Markierungsversuch gezeigt wurde. Auch QK ist geologisch sehr jung und daher hydraulisch noch nicht voll entwickelt, so daß das Karstgrundwasser unter Druck ausfließt.

Die Sägebachquelle (QS)

Im unteren Mahdtal und Schwarzwassertal wird der aus Schrattenkalk bestehenden Karstgrundwasserleiter vom Liegendstauer bedeckt und nach oben abgedichtet. Bei Innerschwende sind jedoch entlang einer auch morphologisch deutlich erkennbaren Störung Leistmergel und Glaukonitsandstein abgetragen, so daß dort Schrattenkalk ansteht. Genau dort befindet sich die Sägebachquelle. Sie ist also ein „Leck" im System. Die Quelle ist durch ein Wehr aufgestaut. Von dort führt eine Rohrleitung zur Turbinenstube am Schwarzwasserbach. Die Sägebachquelle schüttete im Beobachtungszeitraum bis zu 1800 l / s. Auch bei Niedrigwasser, beispielsweise im Winter, schüttet sie noch mindestens 150 l / s und ist dann die größte Karstquelle des Untersuchungsgebietes. Ihre Schüttung ist dann sogar höher, als der gesamte Abfluß des Schwarzwasserbachs. Diese Beobachtung deutet darauf hin, daß die Sägebachquelle nicht nur das Mahdtal entwässert, sondern einen tiefen Auslaß des gesamten Karstgebietes darstellt. Diese Vermutung wurde durch den kombinierten Markierungsversuch bestätigt.

Die Grundquelle in der Breitachschlucht

Bereits CRAMER (1959) stellt fest, daß die Summe aller Quellschüttungen und oberirdischen Abflüsse des Gebietes geringer ist, als aufgrund der Niederschlagsmengen zu erwarten wäre, daß also ein Teil des Wassers „unterirdisch weiter zirkuliert und an unbekannten Stellen zutage tritt". Es wurde versucht, diese „unbekannten Stellen" näher zu lokalisieren: Im Kern der nach ESE abtauchenden Mahdtal-Synklinale bedecken die wasserstauenden Leistmergel den aus Schrattenkalk bestehenden Karstgrundwasserleiter und bilden daher im unteren Schwarzwassertal ein typisches artesisches System. Auch die Breitach verläuft ab der Einmündung des Schwarzwasserbaches bis zur Breitachklamm überwiegend

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

in Leistmergeln. Nur an einer einzigen Stelle, unterhalb der Straßenbrücke von Riezlern nach Schwende, durchschneidet die Breitach die Leistmergel und den Glaukonitsandstein, so daß auf einer Strecke von ca. 200 m Schrattenkalk ansteht. Dort taucht die Antiklinale der Unteren Gottesackerwände in Richtung ESE unter das Breitachtal ab (s. *Abb. 13*). Dies ist ein „Leck" im artesischen System. Aufgrund der geologischen Verhältnisse wurde genau dort eine Grundquelle vermutet, die den tiefsten Auslaß des gesamten Karstsystems darstellen sollte.

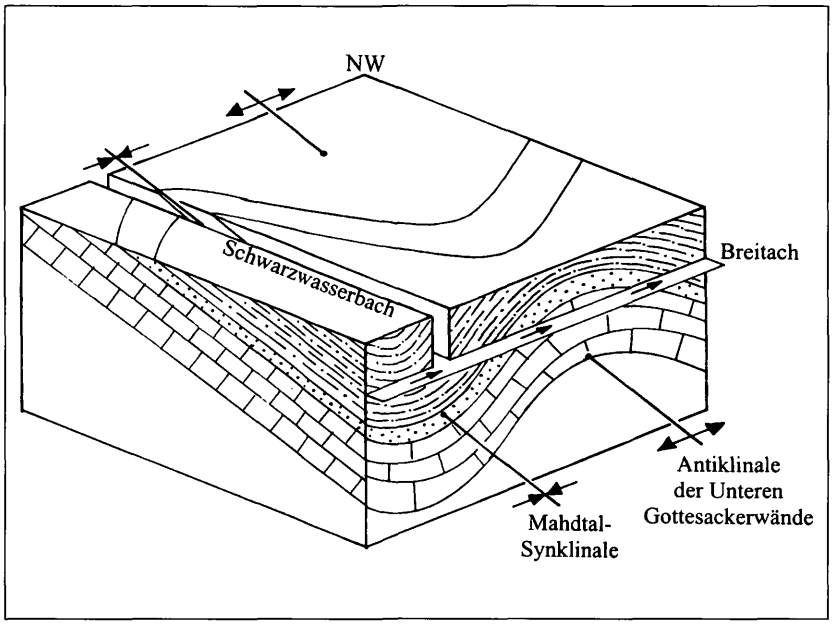


Abb. 13: Schematisches geologisches Blockbild des unteren Schwarzwassertales und der Breitachschlucht bei Außerschwende: Im Kern der abtauchenden Mahdtal-Synklinale bedecken die wasserstauenden Leistmergel den aus Schrattenkalk bestehenden Karstgrundwasserleiter und bilden daher ein artesisches System. Dort wo die Antiklinale der Unteren Gottesackerwände unter das Breitachtal abtaucht, durchschneidet die Breitach die Leistmergel und den Glaukonitsandstein, so daß auf einer Strecke von ca. 200 m Schrattenkalk ansteht. Dort befindet sich die Grundquelle QG

Der Zustrom von kaltem Grundwasser in einer Grundquelle sollte sich durch einen Temperatursprung in der Breitach bemerkbar machen. An 4 Stichtagen wurde daher entlang der Breitach im Bereich der vermuteten Grundquelle an 8 Meßpunkten (P1 bis P8) am orographisch linken Ufer Temperatur und Leitfähigkeit gemessen. Die Meßpunkte P1 und P2 befinden sich stromaufwärts des Schrattenkalks, also oberhalb einer möglichen Grundquelle. Zwischen P1 und P2 erhält die Breitach von rechts einen oberirdischen Zufluß von wenigen m^3 / s (Schmiedebach). Der Meßpunkt P5 befindet sich genau im Kern der Antiklinale. P7 und P8 liegen wieder im Leistmergel, also unterhalb der vermuteten Grundquelle.

In *Abb. 14* ist das Meßprofil vom 11.09.1996 dargestellt. An diesem Tag führte die Breitach nur ca. 5 m^3 / s. An den Meßpunkten P1 bis P4 lag die Wassertemperatur bei 9,4°C, an P5 wurden nur 9,0°C gemessen und bei P6 bis P8 betrug die Temperatur 9,3°C. Da hier der Zustrom von kaltem Grundwasser eine Temperaturerniedrigung der Breitach um 0,1°C bewirkte, ist es möglich, die Schüttung der Grundquelle durch eine Mischungsrechnung abzuschätzen:

Gesucht:

Q_G : Zufluß von Grundwasser [m^3 / s]

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Gemessen:

T_O : Temperatur der Breitach oberhalb der Grundquelle (9,4°C)

T_U : Temperatur der Breitach unterhalb der Grundquelle (9,3°C)

Geschätzt:

Q_O : Abfluß der Breitach oberhalb der Grundquelle (ca. 5 m³/s)

T_G : Temperatur des Grundwassers (ca. 5,7°C) (Das ist die Temperatur, die zur gleichen Zeit an der Sägebachquelle gemessen wurde)

Es gilt :

$$Q_G = Q_O \frac{T_O - T_U}{T_U - T_G} = 0{,}14 \text{ m}^3/\text{s}$$

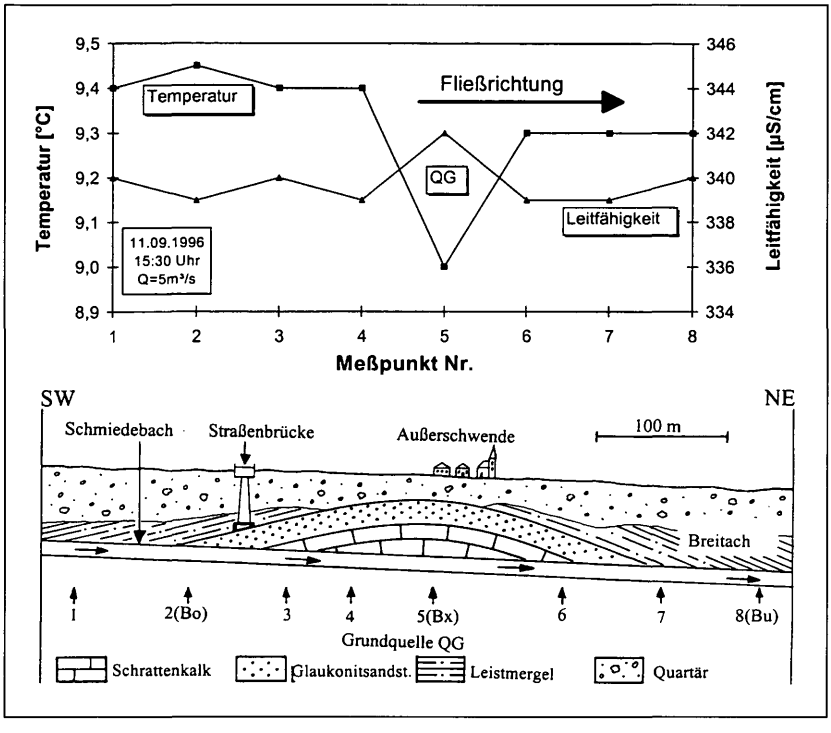


Abb. 14: Geologisches Profil und Profil der Temperatur und Leitfähigkeit im Bereich der vermuteten Grundquelle in der Breitach vom 11.09.1996. Bei P5, also genau im Kern der Antiklinalen ist die Wassertemperatur deutlich erniedrigt, die elektrische Leitfähigkeit ist leicht erhöht. Zwischen P4 und P5 muß sich also die Grundquelle QG befinden

Die Schüttung der Grundquelle beträgt demnach ca. 140 l / s. Diese Rechnung ist jedoch mit großen Ungenauigkeiten behaftet, da die gemessene Temperaturdifferenz sehr klein ist und der Abfluß der Breitach und die Temperatur des Grundwassers nur abgeschätzt werden konnten. Durch Differenzmessungen nach der Salzverdünnungsmethode (KÄSS, 1992) konnte im Sommer 1997 die Schüttung der Grundquelle genauer gemessen werden, sie beträgt 193 l / s.

Auch bei den übrigen 3 Messungen wurden deutliche Abweichungen der Temperatur und Leitfähigkeit bei P5 festgestellt. Dadurch konnte zweifelsfrei gezeigt werden, daß sich bei P5 eine Grundquelle befindet. Der Austritt von Wasser läßt sich jedoch nicht mit bloßem Auge erkennen. Aufgrund ihrer Lage direkt im Vorflutniveau ist QG eine perennierende Quelle mit geringen Schüttungsschwankungen. Die vermutete Funktion von QG als tiefster Auslaß des gesamten Karstgebietes Gottesacker-Schwarzwassertal wurde durch den kombinierten Markierungsversuch nachgewiesen.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

5.1 Quellwassertemperaturen

Im Beobachtungszeitraum (Juli - Oktober 1996) wurden alle Quellen des Gebietes regelmäßig untersucht. Dabei wurden die Temperatur, die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert der Quellwässer gemessen. Die Schüttung wurde mit Eimer und Stoppuhr bestimmt oder durch Abschätzen des Abflußquerschnitts und der Fließgeschwindigkeit ermittelt. Auch Farbe, Trübung, Geruch und Geschmack der Quellwässer wurden beobachtet (GOLDSCHEIDER, 1997).

Als besonders aussagekräftig erwiesen sich die Temperaturmessungen: Die Wassertemperaturen von Quellen, die aus tiefgründigen Porengrundwasserleitern gespeist werden, entsprechen meist der mittleren Jahrestemperatur des Ortes und sind weitgehend konstant, da die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Untergrund mit zunehmender Tiefe rasch abklingen (MATTHESS, 1994). Da die Lufttemperaturen im Hochgebirge mit zunehmender Meereshöhe um ca. 0,6°C pro 100 m abnehmen (HÄCKEL, 1990; REISIGL & KELLER, 1994) sollte also auch die Temperaturen der Quellen mit der Höhe abnehmen.

In *Abb. 15* ist die mittleren Jahreslufttemperatur in Abhängigkeit von der Meereshöhe dargestellt. Sie wurde aus langjährigen Klimadaten der Station Mittelberg-Hirschegg berechnet (Angaben des Landeswasserbauamtes Bregenz). Im gleichen Diagramm sind die mittleren Wassertemperaturen aller untersuchten Quellen im Beobachtungszeitraum (Juli - Oktober 1996) eingetragen.

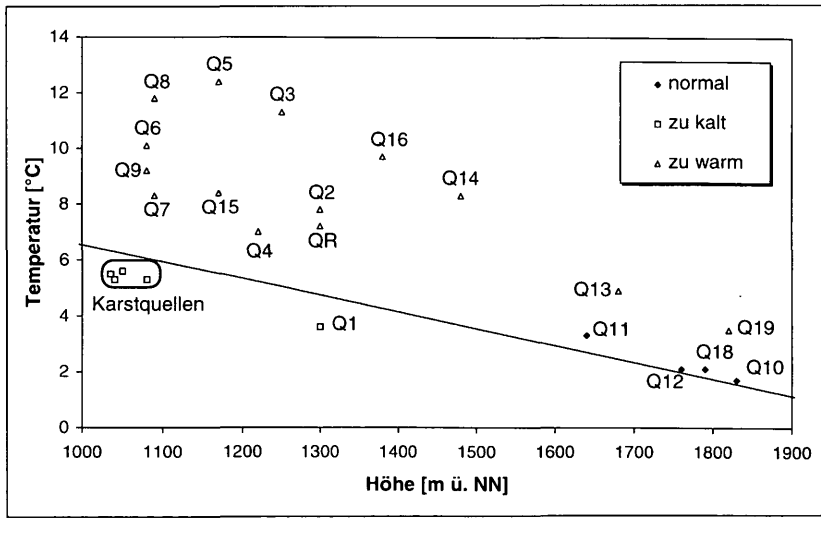


Abb. 15: Durchschnittliche Temperaturen der untersuchten Quellen in Abhängigkeit von der Höhenlage. Die Gerade zeigt den Verlauf der Lufttemperaturen, der aus der Jahresmitteltemperatur der Klimastation Hirschegg (5,7°C) und einer Temperaturabnahme von 0,6°C / 100 m berechnet wurde. Fast alle Quellen sind deutlich wärmer, als es der jeweiligen Höhenlage entsprechen würde. Die Karstquellen sind zu kalt, da sie Zuflüsse aus einem hochgelegenen Einzugsgebiet erhalten. Lediglich die Quellen Q10, Q11, Q12 und Q18 zeigen der Höhenlage entsprechende Temperaturen

Es ist klar erkennbar, daß fast alle Quellen im Sommer 1996 deutlich zu warm waren. Ihre Temperatur lag weit über der Jahresdurchschnittstemperatur, die der jeweiligen Höhenlage entsprechen würde. Es handelt sich demnach um flachgründige Wasservorkommen, die durch sommerliche Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlung erwärmt werden.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Auch der Wiederaustritt des Schwarzwasserbachs unterhalb des Bergsturzes (QR) ist um etwa 2°C wärmer, als es der Höhenlage entsprechen würde und weist außerdem beträchtliche Temperaturschwankungen auf. Dies ist zunächst überraschend, da die Bergsturzmasse ein tiefgründiger Porengrundwasserleiter ist. In diesem Falle ist die sommerliche Erwärmung des bei Galtöde versinkenden Schwarzwasserbachs und die hohe Fließgeschwindigkeit des Grundwassers in der Bergsturzmasse für die hohe Quellwassertemperatur verantwortlich.

Die vier Karstquellen besitzen mit 5,3-5,5°C fast identische Wassertemperaturen und sind um 0,5-1,0°C kälter, als es ihrer Höhenlage entsprechen würde. Dies deutet darauf hin, daß sie gemeinsam ein zusammenhängendes Einzugsgebiet entwässern und insbesondere nach Niederschlägen kalte Zuflüsse aus den Hochlagen des Gottesackers erhalten.

Die Quellgruppe in der Ifenmulde (Q10), die Hausquelle der Ifen-Hütte (Q11) und die Quelle im Mahd (Q12) zeigen normale, der Höhenlage entsprechende Temperaturen. Sie werden also aus Porengrundwasserleitern gespeist, die tiefgründig genug sind, um eine sommerliche Erwärmung des Grundwassers weitgehend zu verhindern.

5.2 Stichtagsbeprobung bei Niedrigwasser

Vom 08.-13.10.1996 wurden alle Quellen des Untersuchungsgebietes hydrochemisch untersucht (nach DVWK, 1992). Die vollständigen Ergebnisse der hydrochemischen Stichtagsbeprobung sind in der Diplomarbeit dargestellt.

Die untersuchten Quellwässer enthalten vor allem gelösten Kalk: Das häufigste Kation ist Calcium, Hydrogencarbonat ist das dominierende Anion. In *Abb. 16* ist zu erkennen, daß die vier Karstquellen (QA, QB, QK und QS) fast identische Konzentrationen an Calcium und Hydrogencarbonat aufweisen. Sie besitzen auch sehr ähnliche Konzentrationen an Magnesium, Sulphat, Natrium und Chlorid. Die hydrochemischen Ähnlichkeiten zwischen QA, QB, QK und QS können nur durch ein gemeinsames, zusammenhängendes Einzugsgebiet erklärt werden.

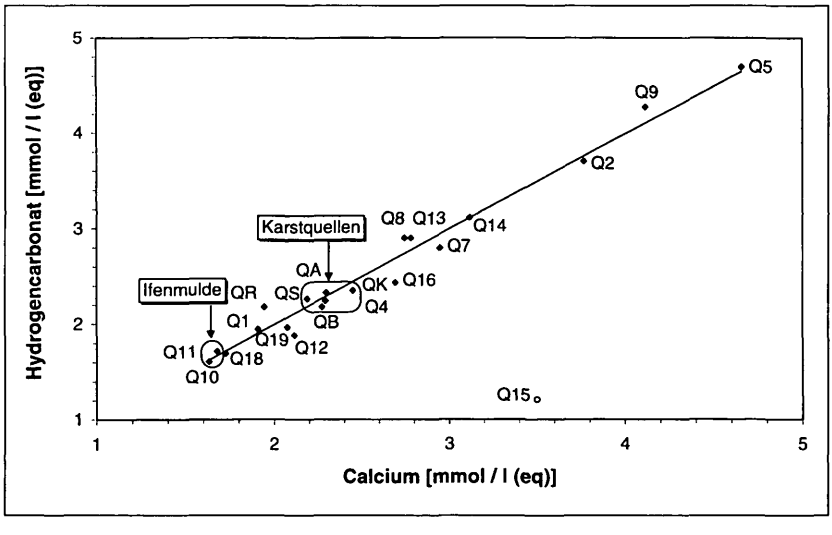


Abb. 16: Calcium- und Hydrogencarbonat-Konzentrationen aller analysierten Wasserproben

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Auffallend sind auch die nahezu übereinstimmenden Konzentrationen an Calcium und Hydrogencarbonat, die in der Quelle in der Ifenmulde (Q10) und der Hausquelle der Ifen-Hütte (Q11) festgestellt wurden. Bei Q10 entspringt ein kleiner Bach. Noch bevor er die Endmoräne am Ausgang der Ifenmulde erreicht, versickert er ganzjährig und vollständig im Hangschutt, um unterhalb des Endmoränenwalls in Q11 wieder zutagezutreten. Die hydrochemische Ähnlichkeit zwischen Q10 und Q11 bestätigt diesen Zusammenhang.

5.3 Belastung der Aubachquelle durch den Ladstattschacht

Der Ladstattschacht ist ein 47 m tiefer Höhlenschacht 1100 m südwestlich der Aubachquelle. Im Sommer 1975 entdeckten Höhlenforscher, daß diese Höhle in den vorausgegangenen 3 Jahren von der Gemeinde Mittelberg vollständig mit Fäkalien und Abfällen gefüllt wurde. Dieser Umweltskandal sorgte europaweit für Schlagzeilen (SPÖTTL, 1988).

Im vorigen Kapitel wurden die großen hydrochemischen Ähnlichkeiten aller Karstquellen dargestellt. Doch es gibt aber auch Unterschiede zwischen der Aubachquelle und den übrigen Karstquellen: die Konzentrationen an Eisen, Mangan und Kalium der Aubachquelle betragen ein Vielfaches der Konzentrationen, die in den anderen Karstquellen festgestellt wurden (s. *Abb. 17*). Die Eisen- und Mangan-Konzentrationen liegen sogar deutlich über den Grenzwerten des BMFJG (1990).

Die Anomalien der Aubachquelle lassen sich durch den Zustrom von Grundwasser aus dem Ladstattschacht mit erhöhten Gehalten an Mangan, Eisen und Kalium erklären:

Unter sauerstoffarmen Bedingungen und in Gegenwart von organischer Substanz werden schwerlösliche Eisen- und Mangan-Oxide mikrobiell reduziert und gelöst. Die erhöhten Eisen- und Mangan-Konzentrationen der Aubachquelle deuten also auf sauerstoffarme Bedingungen im Fäkalkörper des Ladstattschachtes hin.

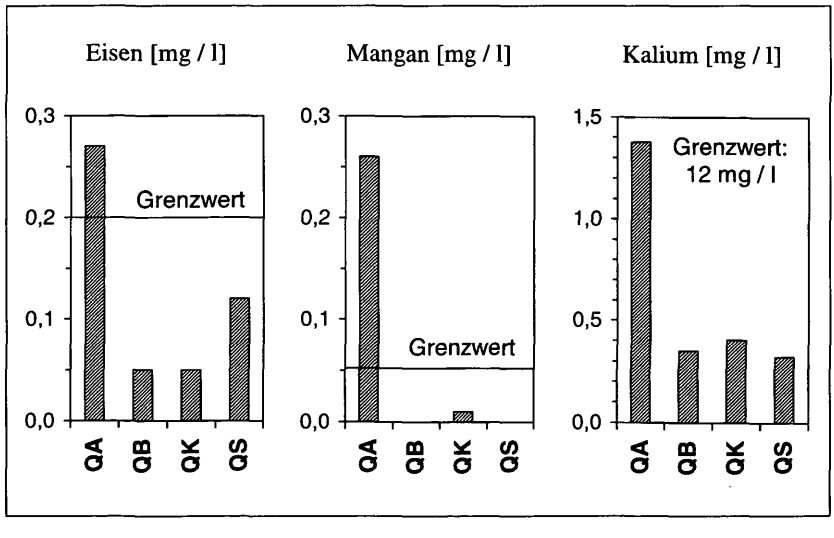


Abb. 17: Konzentrationen von Eisen, Mangan und Kalium der Karstquellen im Vergleich. Die Aubachquelle (QA) zeigt gegenüber den übrigen Karstquellen deutlich erhöhte Werte. Grenzwerte nach BMJFG 1990, aus MATTHESS, 1994

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
Während der hydrochemischen Stichtagsbeprobung lagen die Gehalte aller übrigen Wasserinhaltsstoffe (insbesonder auch an Nitrat, Chlorid, Phosphat und Ammonium) *deutlich* unter den Grenzwerten, was hoffen läßt, daß vom Ladstattschacht zur Zeit nur noch eine geringe Belastung ausgeht.

Wegen der hohen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers und des geringen Schadstoffrückhaltevermögens in diesem extrem verkarsteten Gebiet besteht kein Zweifel, daß der mit Fäkalien gefüllte Ladstattschacht die Aubachquelle (QA) und wahrscheinlich sogar *alle* stromabwärts gelegenen Karstquellen des Gebietes in hohem Maße belastet hat. Da das von der Ladstatt zur Aubachquelle führende Trockental einer bedeutenden Störungszone folgt, ist anzunehmen, daß ein hydraulisch wirksames System von Höhlen und Karstschläuchen den Ladstattschacht direkt mit der Aubachquelle verbindet. Im August 1997 wurde durch einen weiteren kombinierten Markierungsversuch gezeigt, daß die Aubachquelle und die übrigen Karstquellen im unteren Schwarzwassertal Zuflüsse vom Ladstattschacht erhalten (GOLDSCHEIDER, 1998a). Die beschriebene hydrochemische Anomalie der Aubachquelle konnte jedoch bei einer weiteren Beprobung nicht bestätig werden (SINREICH, 1998).

6. Der kombinierte Markierungsversuch

6.1 Allgemeines zu Markierungsversuchen

Grundsätzlich funktioniert ein Markierungs- oder Tracerversuch so: An einer oder mehreren Stellen wird ein Markierungsstoff (Tracer) ins Grundwasser eingegeben, an anderen Stellen wird beobachtet, ob, wann und in welcher Konzentration der Tracer ankommt. Bei einem kombinierten Markierungsversuch werden mehrere Tracer eingesetzt. Eine Vielzahl von Substanzen lassen sich als Markierungsstoffe verwenden, beispielsweise Salze, radioaktive Isotope oder auch gefärbte Bärlapp-Sporen. Die wichtigsten Tracer sind jedoch Fluoreszenzfarbstoffe. Durch Markierungs- oder Tracerversuche kann festgestellt werden, *wohin* das Grundwasser fließt, *woher* eine Quelle ihr Wasser erhält, *ob* eine unterirdische hydraulische Verbindung zwischen zwei Punkten besteht, oder *wie* sich Schadstoffe im Untergrund ausbreiten.

Durch einen Markierungsversuch kann auch die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers ermittelt werden. Es ist jedoch nicht möglich, die tatsächliche Bahngeschwindigkeit des Wassers auf seinem kurvenreichen Weg durch den Untergrund zu bestimmen. Aus der Fließzeit und dem Abstand zwischen Eingabestelle und Austrittsstelle kann aber die sogenannte Abstandsgeschwindigkeit berechnet werden. Die *maximale* Abstandsgschwindigkeit ergibt sich aus dem Zeitpunkt des ersten Nachweises, die *dominierende* Abstandsgeschwindigkeit aus dem Zeitpunkt der höchsten gemessenen Konzentration des verwendeten Tracers in der Beobachtungsstelle (KÄSS, 1992).

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

6.2 Überblick

Am 20.09.1996 wurde im Gebiet Gottesacker und Schwarzwassertal ein kombinierter Markierungsversuch durchgeführt (GOLDSCHEIDER, 1996 & 1997). Ziel des Versuches war es, die hydraulischen Verhältnisse der Karstentwässerung zu untersuchen. Hierbei sollten die unterirdischen Abflußrichtungen, die Fließzeiten und die Einzugsgebiete einzelner Quellen erfaßt werden. Zusätzlich waren damit Hinweise zu einem möglichen Schadstofftransport zu erhalten.

Zur Eingabe wurden 2 Stellen ausgewählt: die Ponordoline am Geißbühl und der ehemalige Abwasserversickerungsschacht bei der Bergstation Hahnenköpflebahn. Um einen möglichen Tracerdurchgang zu erfassen, wurden der Schwarzwasserbach und insgesamt 10 Quellen im Schwarzwassertal beobachtet und durch die Entnahme von Wasserproben und den Einsatz von Aktivkohlesäckchen beprobt.

Die Lage der Eingabe- und Beobachtungsstellen und die durch den Markierungsversuch belegten Verbindungen sind in *Abb. 18* dargestellt.

6.3 Fragestellungen

Durch den Markierungsversuch sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Ist es möglich, jeder Karstquelle ein klar abgrenzbares unterirdisches Einzugsgebiet zuzuordnen, oder entwässern alle Quellen gemeinsam einen großen, zusammenhängenden Karstgrundwasserleiter?
- Wird der Schwarzwasserbach oberhalb der Estavelle tatsächlich ausschließlich von Zuflüssen aus dem oberen Schwarzwassertal und von den Flyschbergen der orographisch rechten Talseite gespeist, erhält also keinerlei Zuflüsse aus dem Gottesackergebiet?
- Wird die Sägebachquelle nur von unterirdischen Zuflüssen aus dem Mahdtal gespeist oder ist sie auch an der Entwässerung des Gottesackergebietes und des Schwarzwassertales beteiligt? In diesem Fall würde das Grundwasser unter dem Mahdtal hindurchfließen.

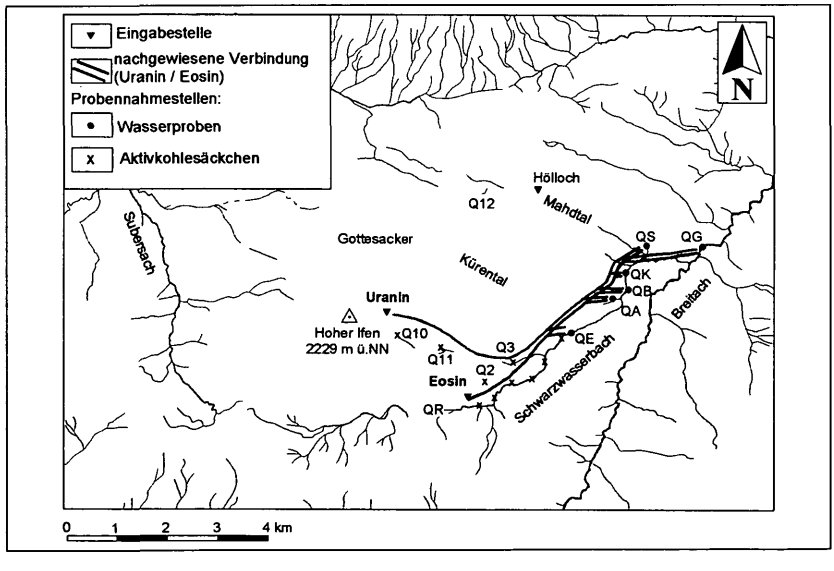


Abb. 18: Gewässernetz und Quellen im Untersuchungsgebiet, Lage der Eingabe- und Probennahmestellen während des kombinierten Markierungsversuches und nachgewiesene Verbindungen. Die Verbindung Hölloch-Sägebachquelle (QS) wurde bereits 1949 und 1955 nachgewiesen

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

- Stellt die neu entdeckte Grundquelle in der Breitach tatsächlich den tiefsten Auslaß des Gottesackergebietes dar?
- Wie hoch sind die Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers auf dem Gottesacker (Plateauabfluß) und im Schwarzwassertal (Talabfluß).

Neben den hydrogeologischen Verhältnissen sollten aber auch Fragen des Schutzes und der Gefährdung des Grundwassers geklärt werden:

- Welche Quellen wären von einem Schadstoffeintrag im Gottesackergebiet betroffen?
- Wie schnell und in welchen Verdünnungen würde sich ein Schadstoffeintrag in den einzelnen Quellen bemerkbar machen?
- Wird die Hausquelle der Ifen-Hütte (Q11) ausschließlich von der Ifen-Mulde gespeist oder besteht ein Zusammenhang mit dem Karstgrundwasserleiter des Gottesackers?

6.4 Auswahl der Eingabestellen

Der Abwasserschacht der Bergstation Hahnenköpflebahn

Die Bergstation Hahnenköpflebahn liegt am Südrand des Gottesackerplateaus in einer Höhe von 2030 m.ü.NN auf extrem verkarstetem Schrattenkalk. Die Hahnenköpflebahn ist lediglich in der Wintersaison in Betrieb. Im Bergrestaurant, welches an 110 bis 120 Tagen pro Wintersaison bewirtschaftet ist, befinden sich 80 Sitzplätze (Angaben der Betreiber). Von der Bergstation führt eine Rohrleitung zu einem Abwasserschacht in einer zubetonierten Karstspalte. Dort wurden Abwässer in den Karstgrundwasserleiter eingeleitet. Seit der Wintersaison 1996 / 1997 ist jedoch eine Kläranlage und ein geschlossenes Wasserkreislaufsystem in Betrieb.

Abb. 19: Der Abwasserschacht der Bergstation Hahnenköpflebahn diente während des kombinierten Markierungsversuches als Uranin-Eingabestelle

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Im September 1996 wurde die Kläranlage mit 10 m³ Wasser auf ihre Dichtigkeit geprüft. Diese Wassermenge wurde von der Ifen-Lift Alfons Herz KG freundlicherweise für den Markierungsversuch zur Verfügung gestellt. Der Abwasserschacht der Bergstation ist aus folgenden Gründen eine ideale Eingabestelle:

- Die Bergstation steht in dem Teil des Untersuchungsgebietes, der am höchsten gelegen und am weitesten von den Karstquellen im Tal entfernt ist. Von dort aus muß der Tracer mindestens 700 Höhenmeter auf einer Strecke von ca. 3 km zurücklegen, bevor er das Schwarzwassertal erreicht. So ist es möglich, die Abstandsgeschwindigkeiten im seichten Hochkarst abzuschätzen.
- Eine Tracer-Eingabe in den Abwasserschacht ist eine eindeutige Methode, zu klären, welche Quellen in den vergangenen Jahren durch die Einleitung von Abwässern betroffen wurden.
- Außer an der Bergstation gibt es auf dem gesamten Gottesackerplateau kein Wasser, das man für eine Tracer-Eingabe verwenden könnte. Es bestünde lediglich die Möglichkeit, Wasser und Gerätschaften mit dem Hubschrauber auf den Gottesacker zu transportieren oder Altschneereste in Dolinen zu schmelzen.

Die Ponordoline am Geißbühl

Diese trichterförmige Ponordoline befindet sich im Schwarzwassertal etwa 500 m südwestlich der Auenhütte und entwässert einen Teil des Geißbühl-Moores. Sie wurde aus folgenden Gründen als Eingabestelle gewählt:

- Die Tracer-Eingabe am Geißbühl markiert den Grundwasserleiter des Schwarzwassertales weit oberhalb aller möglichen Austrittsstellen. So können die Fließgeschwindigkeiten im Talbereich bestimmt werden.
- Mit diesem Versuch sollte die vermutete Funktion des Karstkörpers im Schwarzwassertal als unterirdische Dränschiene für die vom Gottesacker abfließenden Karstwässer überprüft werden.
- Eine Tracer-Eingabe in eine aktive Ponordoline ist einfach durchzuführen, da keine Vor- oder Nachspülung notwendig ist. Der Fluoreszenzfarbstoff wird lediglich angerührt und kann dann direkt eingegeben werden.

6.5 Auswahl der Beobachtungsstellen

Der Schwarzwasserbach oberhalb und unterhalb der Estavelle (QE)

Nach der hier zugrundegelegten Modellvorstellung sollte der Schwarzwasserbach oberhalb der Estavelle keine Zuflüsse aus dem Gottesackergebiet erhalten und daher frei von Tracern bleiben. Um dies zu überprüfen, wurde der Bach direkt oberhalb der Estavelle regelmäßig beprobt. Zusätzlich wurden an 6 Stellen im Schwarzwasserbach Aktivkohlesäckchen aufgehängt, um im unwahrscheinlichen Fall eines Farbstoffaustritts die Austrittsstelle lokalisieren zu können.

Während des Tracerversuchs arbeitete die Estavelle als Grundquelle. Daher sollte dort das Grundwasser des Schwarzwassertals, das durch unterirdische Zuflüsse aus dem Gottesackergebiet gespeist wird, zutage treten. Da die Estavelle die höchstgelegene Austrittsstelle darstellt und sich am nächsten an den Eingabestellen

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
befindet, sollten dort die Tracer am schnellsten und in den höchsten Konzentrationen ankommen. Daher wurde der Schwarzwasserbach unterhalb der Estavelle intensiv beprobt.

Die Aubachquelle (QA)
Bereits vor dem Markierungsversuch wurde die Vorstellung entwickelt, daß die Aubachquelle nicht nur das Kürental entwässert, sondern bei vollständiger Versinkung an der Estavelle ihr Wasser aus dem gesamten Schwarzwassertal stromaufwärts der Quelle erhält, also von der orographisch linken und rechten Talseite. Bei Hochwasser, wenn die Estavelle zur Grundquelle wird, sollte sie zumindest das Karstgebiet entwässern. Daher wurde die Aubachquelle intensiv beprobt.

Die Bürgermeisterquelle (QB)
Da die Bürgermeisterquelle die höchstgelegene perennierende Karstquelle des Tales ist, wurde sie intensiv beprobt. Die Quelle selbst ist zugemauert und daher nicht direkt zugänglich. Es ist jedoch möglich, durch ein Fenster in dieser Mauer einen Schlauch einzuführen und mithilfe einer Pumpe Wasserproben zu entnehmen.

Die Sägebachquelle (QS)
Bei Markierungsversuchen in den Jahren 1949 und 1955 wurde durch Uranin-Eingabe ins Hölloch bewiesen, daß die Sägebachquelle das Mahdtal entwässert (SPÖCKER, 1961). Sowohl WAGNER (1950), als auch CRAMER (1959) gehen davon aus, daß das unterirdische Einzugsgebiet dieser Quelle lediglich das Mahdtal umfaßt. Im Rahmen des kombinierten Markierungsversuches sollte geklärt werden, ob die Sägebachquelle ihr Wasser auch aus dem Schwarzwassertal erhält, also einen tiefen Auslaß des gesamten Karstgebietes darstellt. Dies würde bedeuten, daß das Karstgrundwasser aus dem Schwarzwassertal unter dem Mahdtalbach hindurchfließt. Um dies zu klären, wurde die Sägebachquelle intensiv beprobt.

Die Grundquelle in der Breitach (QG)
Nach der hier zugrundegelegten Modellvorstellung stellt die neu entdeckte Grundquelle in der Breitach den tiefsten direkten Auslaß des gesamten Karstsystems dar. Um dies nachzuweisen, wurden unterhalb, direkt bei und oberhalb der Grundquelle Proben entnommen. Falls zu mindestens einem Zeitpunkt die Tracerkonzentration direkt bei der Grundquelle deutlich erhöht wäre und die Breitach unterhalb der Grundquelle eine höhere Konzentration enthalten würde als oberhalb, so wäre dies ein sicherer Nachweis, daß die Grundquelle tatsächlich einen Auslaß des Karstsystems Gottesacker und Schwarzwassertal darstellt.

Ein Nachweis mit Tracermethoden erschien aus folgenden Gründen jedoch erschwert:

- Auch die Breitach oberhalb der Grundquelle ist durch den Zufluß des Schwarzwasserbaches mit Fluoreszenzfarbstoffen kontaminiert. Ein Traceraustritt an der Grundquelle läßt sich also nur dann nachweisen, wenn die Tracerkonzentration der Grundquelle deutlich höher als diejenige des Flußwassers ist.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

- Die Schüttung der Quelle ist sehr klein im Vergleich zum Abfluß der Breitach. Die Farbstoffe erfahren daher eine starke Verdünnung, die den Nachweis erschwert.
- Zwischen den Probenahmestellen direkt bei und oberhalb der vermuteten Grundquelle erhält die Breitach einen oberirdischen Zufluß durch den Schmiedebach, der frei von Tracern ist. Eine geringe Erhöhung der Tracerkonzentration in der Breitach durch den Zutritt von tracerhaltigem Wasser der Grundquelle wird also durch die Zumischung von tracerfreiem Oberflächenwasser ausgeglichen und ist daher kaum nachweisbar.

Dennoch erschien es möglich, die Grundquelle im Rahmen dieses Tracerversuches nachzuweisen: Da sie am weitesten von den Eingabestellen entfernt ist, sollte sie erst wesentlich später von den Farbstoffen erreicht werden und wesentlich länger Tracer enthalten, als die Karstquellen stromaufwärts. Daher sollte es einen Zeitpunkt geben, zu dem die Breitach oberhalb der Grundquelle bereits nahezu frei von Fluoreszenzfarbstoffen ist, während die Grundquelle noch eine relativ hohe Konzentration enthält, so daß sich eine deutliche Erhöhung der Konzentration in der Breitach unterhalb der Grundquelle feststellen lassen müßte. Daher wurde erst 2 Tage nach der Eingabe mit der Probennahme in der Breitach begonnen, als die sichtbaren Farbstoffaustritte in den Karstquellen bereits beendet waren.

Weitere Probennahmestellen

Die kleine Karstquelle bei Kesselschwand (QK) wurde nicht regelmäßig beprobt. Es wurden jedoch zwei Stichproben entnommen, um zu überprüfen, ob eine Verbindung zu den Eingabestellen besteht. Nach der hydrogeologischen Aufnahme war zu erwarten, daß die Farbstoffe ausschließlich bei der Estavelle und den Karstquellen im unteren Schwarzwassertal ankommen. Sämtliche anderen, kleineren Quellen sollten von lokalen Porengrundwasserleitern gespeist werden und unabhängig vom Karstgrundwasserleiter sein. Daher sollte dort kein Farbstoff ankommen. Um dies zu überprüfen wurden in folgenden Quellen Aktivkohlesäckchen eingehängt:

Q2: Quelle bei der Auenhütte
Q3: Quelle unterhalb des Fuchslochs
Q10: Quellgruppe in der Ifenmulde
Q11: Hausquelle der Ifen-Hütte

Von besonderem Interesse war dabei die Hausquelle der Ifenhütte, die für die Wasserversorgung der Hütte genutzt wird. Diese Quelle befindet sich in ca. 1800 m Entfernung in Fallinie unterhalb der Bergstation. Sie wird vom Porengrundwasserleiter der Ifenmulde gespeist. Eine Verbindung zum Karstgrundwasserleiter konnte jedoch nicht sicher ausgeschlossen werden, so daß es sinnvoll erschien, diese Quelle mit Aktivkohlesäckchen zu beproben.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

6.6 Auswahl der Markierungsmittel und Eingabe

Als Tracer wurden die beiden Fluoreszenzfarbstoffe Uranin und Eosin ausgewählt, da sie

- dank ihrer extrem niedrigen Nachweisgrenze noch in sehr starken Verdünnungen nebeneinander nachweisbar sind,
- im natürlichen Grundwasser nicht vorhanden sind,
- vom Grundwasser leicht transportiert werden, ohne die Eigenschaften des Wassers zu verändern und bei der Untergrundpassage kaum abgebaut, sorbiert oder ausgefällt werden,
- leicht und ungefährlich zu handhaben und relativ preiswert zu beschaffen sind und
- in den zu erwartenden Konzentrationen keine Gefahr für Grund- und Oberflächenwasser darstellen (MATTHESS & UBELL, 1983).

Zur Abschätzung der Markierungsmittelmenge gibt es zahlreiche Berechnungsformeln (KÄSS, 1992), die jedoch nur ungefähre Anhaltspunkte liefern (s. *Tab. 1*).

Tab. 1: Berechnung der benötigten Tracermengen

verwendete Berechnungsformel (aus KÄSS, 1992)		berechnete Tracermenge [kg]	
Quelle	Formel	Uranin (Bergstation)	Eosin (Doline)
DIENERT (1913), für Uranin	$M = Q \cdot L \cdot k$	6,08	-
UNESCO 1 (1973-1983), für Uranin	$M = L \cdot K$	0,97 - 4,87	-
MARTEL (1921), für Uranin	$M = Q \cdot L$	24,35	-
SILINE-BEKTCHOURINE (1959)	$M = L \cdot C$	0,97 - 4,87	0,97 - 4,87
KÄSS (1992)	$M = L \cdot c \cdot B$	0,49 - 4,38	2,68 - 24,1

M : Tracermenge [kg]
Q : Schüttung aller Quellen [» 5 m³ / s]
L : Entfernung zum wichtigsten Beobachtungspunkt [km]
(Bergstation-Aubachquelle: 4,870 km; Doline am Geißbühl-Moor-Aubachquelle: 3,540 km)
k : Beiwert für das Markierungsmittel (Uranin: k = 0,25)
K : Beiwert für den Grundwasserleiter (Karst: K = 0,2 bis 1,0)
C : Faktoren für Markierungsmittel und Untergrund
(Uranin und Eosin im Karst: C = 0,2 bis 1)
c : Beiwert für das Markierungsmittel, wenn dies nicht Uranin ist (Eosin: c = 5,5)
B : Faktor für Rahmenbedingungen
(unterirdische Gerinne mit raschem Durchfluß: B = 0,1 bis 0,9)

In den Abwasserschacht der Bergstation Hahnenköpfle wurden 4,8 kg Uranin eingegeben. Das Pulver wurde vor Ort in 80 l Wasser angerührt. Als Vorspülung wurden ca. 3 m³ Wasser eingeleitet. Die Uranin-Eingabe begann um 10:50 Uhr und war um 11:10 Uhr abgeschlossen. Als Nachspülung wurden 7 m³ Wasser verwendet. Wegen dieser großen Wassermenge und der Schneeschmelze konnte man davon ausgehen, daß der Farbstoff das Tal erreicht und nicht in unterirdischen Reservoirs liegenbleibt. In die Ponordoline am Geißbühl-Moor wurden 5 kg Eosin eingegeben. Das Pulver wurde in ca. 50 l Wasser angerührt. Die Eingabe begann um 15:10 Uhr und dauerte bis ca. 15:30 Uhr.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

6.7 Analytik

Insgesamt 188 Wasserproben wurden entnommen, in braune 50 ml Glasfläschchen abgefüllt und bis zur Untersuchung im Labor der AGK dunkel gelagert. Die beiden Fluoreszenzfarbstoffe Uranin und Eosin wurden ohne vorherige Trennung des Farbstoffgemisches mit einem PERKIN-ELMER Spektralfluorimeter nach dem Synchron-Scan-Verfahren gemessen. Die insgesamt 38 eingesetzten Aktivkohlesäckchen wurden ebenfalls dunkel gelagert und einige Tage luftgetrocknet. Die an die Aktivkohle adsorbierten Substanzen wurden dann mit einem Elutionsmittel desorbiert und spektralfluorimetrisch auf Eosin und Uranin untersucht.

6.8 Ergebnisse

Am 21. September 1996, dem Tag nach der Farbstoffeingabe, kam es in allen Karstquellen des Schwarzwassertales (QE, QA, QB, QK und QS) zu deutlich sichtbaren Farbstoffaustritten: das Wassser färbte sich durch Uranin intensiv grün. Am Abend des 21. September 1996 ließ die Färbung wieder nach. Eine rötliche Färbung durch Eosin war mit bloßem Auge nicht sicher zu erkennen, ließ sich aber im Labor zweifelsfrei nachweisen. Noch 14 Tage nach dem Versuch waren beide Farbstoffe im Quellwasser nachweisbar.

Tracernachweis im Schwarzwasserbach unterhalb der Estavelle

Bereits 14 Stunden nach der Eingabe konnte das an der Bergstation eingegebene Uranin in der 4,08 km entfernten Estavelle nachgewiesen werden (s. *Abb. 20*). Aus dem Zeitpunkt des ersten Auftretens des Uranins und der Entfernung zwischen Eingabe- und Austrittsstelle läßt sich die maximale Abstandsgeschwindigkeit berechnen, sie beträgt 291 m / h. Nach dem ersten Auftreten stieg die Uranin-Konzentration im Schwarzwasserbach unterhalb der Estavelle sehr rasch an und erreichte 16,5 Stunden nach der Eingabe mit 7,96 x 10^{-2} mg / l ihren höchsten Wert. Aus dem Zeitpunkt der höchsten Konzentration ergibt sich eine dominierende Abstandsgeschwindigkeit von 247 m / h.

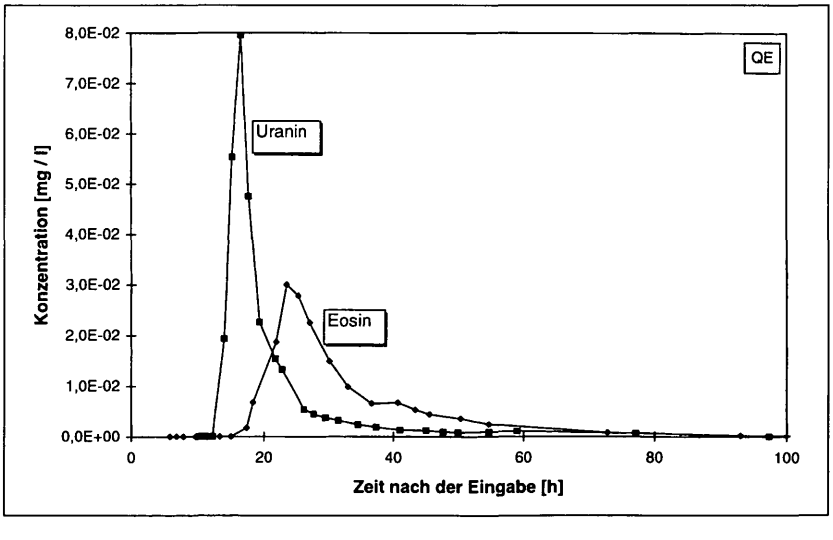


Abb. 20: Tracer-Durchgangskurven der Estavelle, im Schwarzwasserbach unterhalb der Estavelle gemessen

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
Eosin konnte erst 17,4 Stunden nach der Eingabe nachgewiesen werden, also später als Uranin. Dies ist bemerkenswert, da die Eosin-Eingabestelle nur 2,50 km von der Estavelle entfernt liegt. Nach 23,4 Stunden wurde die höchste Konzentration festgestellt. Die daraus berechneten Geschwindigkeiten sind nur etwa halb so groß wie diejenigen für Uranin: Die maximale Abstandsgeschwindigkeit beträgt 144 m / h, die dominierende Abstandsgeschwindigkeit 107 m / h. Die Eosin-Durchgangskurve der Estavelle ist wesentlich niedriger und breiter, als die entsprechende Kurve für Uranin. Dies bedeutet, daß das Eosin langsamer transportiert wurde und dabei eine höhere Dispersion erfuhr, so daß das Maximum später erreicht wurde und die Maximalkonzentration geringer war und anschließend langsamer abfiel als beim Uranin.

Wie erwartet blieb der Schwarzwasserbach oberhalb der Estavelle während der gesamten Beobachtungszeit frei von Farbstoffen, wie sowohl durch den Einsatz von Aktivkohlesäckchen als auch durch regelmäßige Probennahme gezeigt werden konnte.

Tracernachweis in allen Karstquellen im unteren Schwarzwassertal

17,0 Stunden nach der Eingabe wurde das erste Auftreten von Uranin in der Aubachquelle nachgewiesen. Die höchste Konzentration betrug hier $5{,}17 \cdot 10^{-2}$ mg / l und wurde 20,0 Stunden nach der Eingabe erreicht. Erst nach 22,2 Stunden erreichte das Eosin die Aubachquelle.

Bereits 15,6 Stunden nach der Eingabe wurde Uranin in der Bürgermeisterquelle nachgewiesen, also noch vor dem ersten Nachweis in der Aubachquelle, obwohl QB weiter von der Eingabestelle entfernt ist als QA. Dies kann aber auch auf größere Beprobungsintervalle während der Nachtstunden (alle 2 Stunden) zurückzuführen sein.

Auch in der kleinen Karstquelle bei Kesselschwand wurden beide Farbstoffe nachgewiesen. Damit ist die Verbindung zwischen den Eingabestellen und dieser Quelle belegt.

In der Sägebachquelle, wurden Uranin und Eosin nach 27,1 bzw. 33,2 Stunden zum ersten mal nachgewiesen. Damit ist bewiesen, daß diese Quelle nicht nur das Mahdtal entwässert, sondern auch einen tiefen Auslaß des gesamten Karstsystems darstellt. Das Grundwasser aus dem Schwarzwassertal fließt also unter dem Mahdtal hindurch und steigt auf der anderen Talseite zur Sägebachquelle auf.

Die Tracer-Durchgangskurven von QA, QB und QS ähneln stark den entsprechenden Durchgangskurven der Estavelle und werden hier daher nicht gesondert dargestellt.

In allen Quellen konnte das erste Auftreten von Uranin noch vor dem ersten Auftreten von Eosin nachgewiesen werden, obwohl die Uranin-Eingabestelle weiter von den Quellen entfernt ist als die Eosin-Eingabestelle. Auch die Maximalkonzentrationen des Uranins sind in allen Probennahmestellen etwa 3 mal so hoch, wie diejenigen des Eosins. Vermutlich erfolgt der Plateauabfluß vom Gottesacker in offenen Höhlenbächen, die ähnlich hohe Fließgeschwindigkeiten wie Oberflächengewässer besitzen, während im Schwarzwassertal eher druckhafte Fließvorgänge mit entsprechend niedrigeren Fließgeschwindigkeiten zu erwarten sind.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

In *Abb.* 21 sind die Uranin Durchgangskurven aller Probenahmestellen in einem Diagramm dargestellt. Man erkennt deutlich, daß die Durchgangskurven immer flacher und breiter werden, je weiter die Probenahmestellen von der Eingabestelle entfernt liegen.

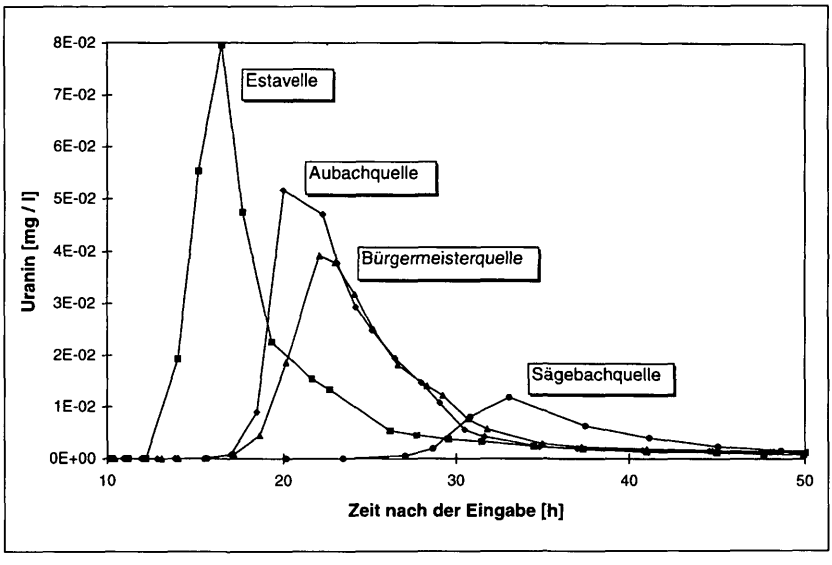


Abb. 21: Uranin-Durchgangskurven aller Probenahmestellen im Vergleich. Je weiter die Entfernung zur Eingabestelle, umso später kommt der Tracer an und umso höher ist die Dispersion

Die Zeitpunkte des ersten Auftretens und der höchsten Konzentration von Uranin und Eosin und die daraus berechneten maximalen und dominierenden Abstandsgeschwindigkeiten sind *Tab. 2* und *Tab. 3* zu entnehmen.

Tab. 2: Zeitpunkte des ersten Auftretens und der höchsten Konzentration von Uranin in den Beobachtungsstellen. Daraus berechnete maximale und dominierende Abstandsgeschwindigkeiten

Uranin							
	Entfernung zur Eingabestelle	Zeitpunkt des ersten Auftretens	Zeitpunkt der höchsten Konz.	maximale Abstandsgeschwindigkeit v_{a1}		dominierende Abstandsgeschwindigkeit v_{adom}	
	[km]	[h] nach der Eingabe		[m/h]	[m/s]	[m/h]	[m/s]
Estavelle	4,08	14,0	16,5	291	$8{,}10 \cdot 10^{-2}$	247	$6{,}87 \cdot 10^{-2}$
Aubach-quelle	4,87	17,0	20,0	286	$7{,}96 \cdot 10^{-2}$	244	$6{,}76 \cdot 10^{-2}$
Bürgerm.-quelle	5,16	15,6	22,2	331	$9{,}20 \cdot 10^{-2}$	233	$6{,}47 \cdot 10^{-2}$
Sägebach-quelle	5,68	27,1	33,1	210	$5{,}83 \cdot 10^{-2}$	172	$4{,}77 \cdot 10^{-2}$
Mittelwerte der Geschwindigkeiten				280	$7{,}77 \cdot 10^{-2}$	224	$6{,}22 \cdot 10^{-2}$

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Eosin	Entfernung zur Eingabestelle	Zeitpunkt des ersten Auftretens	Zeitpunkt der höchsten Konz.	maximale Abstands-geschwindigkeit v_{a1}		dominierende Abstands-geschwindigkeit v_{adom}	
	[km]	[h] nach der Eingabe		[m/h]	[m/s]	[m/h]	[m/s]
Estavelle	2,50	17,4	23,4	144	$3,99 \cdot 10^{-2}$	107	$2,97 \cdot 10^{-2}$
Aubach-quelle	3,54	22,2	24,8	160	$4,44 \cdot 10^{-2}$	143	$3,97 \cdot 10^{-2}$
Bürgerm.-quelle	3,88	22,3	30,7	174	$4,83 \cdot 10^{-2}$	127	$3,51 \cdot 10^{-2}$
Sägebach-quelle	4,72	33,2	44,3	142	$3,95 \cdot 10^{-2}$	106	$2,96 \cdot 10^{-2}$
Mittelwerte der Geschwindigkeiten				155	$4,30 \cdot 10^{-2}$	121	$3,35 \cdot 10^{-2}$

Tab. 3: Zeitpunkte des ersten Auftretens und der höchsten Konzentration von Eosin in den Beobachtungsstellen. Daraus berechnete maximale und dominierende Abstandsgeschwindigkeiten

Nachweis der Grundquelle in der Breitach

Die Schwierigkeiten, mit einem Markierungsversuch zu überprüfen, ob die Grundquelle in der Breitach tatsächlich den tiefsten Auslaß des gesamten Karstsystems darstellt, wurden oben beschrieben. Dennoch ist der erhoffte Nachweis geglückt (s. *Abb. 22*): Am 29.09.1996, also 9 Tage nach der Eingabe, enthielt die Breitach oberhalb der vermuteten Grundquelle nur noch eine Eosin-Konzentration von 1×10^{-5} mg / l. Dieser Wert liegt im Bereich der Nachweisgrenze. Direkt bei der Grundquelle war die Eosin-Konzentration mit 7×10^{-5} mg / l deutlich erhöht. Dies läßt sich nur durch den Zustrom von Eosin-haltigem Karstgrundwasser erklären. Unterhalb der Grundquelle war die Konzentration mit 5×10^{-5} mg / l wieder etwas geringer, aber noch deutlich höher als oberhalb. Dies ist der erhoffte Beweis für die wichtige Funktion dieser Quelle als tiefster Auslaß des gesamten Karstsystems.

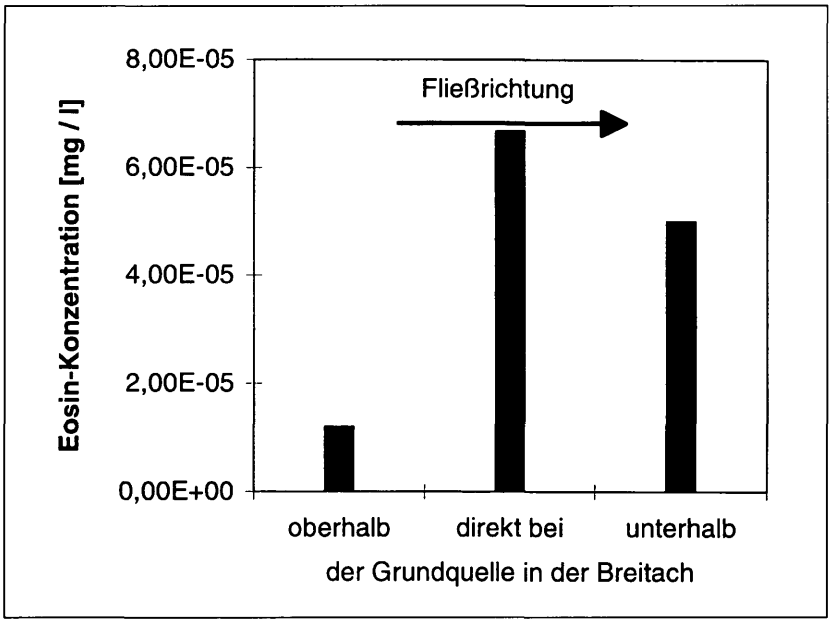


Abb. 22: Eosin-Konzentration in der Breitach am 29.09.1996, oberhalb, direkt bei und unterhalb der Grundquelle (QG) in der Breitach. Die Eosin-Konzentration ist unterhalb der Grundquelle deutlich höher als oberhalb und direkt bei der Grundquelle am höchsten. Dies beweist, daß hier Karstwasser aus dem Gebiet Gottesacker-Schwarzwassertal austritt. Die Grundquelle ist demnach der tiefste Austritt des Karstsystems

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

7.1 Hydraulische Zusammenhänge

Im Untersuchungsgebiet bildet der Schrattenkalk einen etwa 100 m mächtigen Karstgrundwasserleiter. Die Drusbergschichten sind der Liegendstauer, Glaukonitsandstein, Leistmergel und Flysch bilden den Hangendstauer. Nahezu die gesamte Oberfläche des Gottesackers wird von Schrattenkalk gebildet, hier liegt seichter Hochkarst vor (KRIEG, 1969).

Die Tiefenlinien der Synklinalen stellen für den Plateauabfluß vom Gottesacker bevorzugte Entwässerungsbahnen dar. Das Gottesackergebiet ist daher ein Beispiel für synklinalkonforme Karstentwässerung (ORTH, 1984 & 1992). Im Schwarzwassertal taucht der Schrattenkalk unter den Hangendstauer ab und bilden dort einen zusammenhängenden Karstgrundwasserleiter.

Im Schwarzwasserbach oberhalb der Estavelle war kein Tracer nachzuweisen. Das bedeutet, daß der Schwarzwasserbach in diesem Bereich ausschließlich von oberirdischen Zuflüssen aus dem oberen Schwarzwassertal und von den Flyschbergen der orographisch rechten Talseite gespeist wird und keine Zuflüsse aus dem Gottesackergebiet erhält. Das Karstgebiet der orographisch linken Talseite entwässert demnach ausschließlich unterirdisch. Der Talgrundwasserleiter des Schwarzwassertales sammelt die vom seichten Hochkarst abfließenden Wässer und leitet sie an die Karstquellen des unteren Schwarzwassertales weiter. Die Estavelle stellt eine Verbindung zwischen dem oberirdischen Schwarzwasserbach und dem unterirdischen Karstgrundwasserleiter dar.

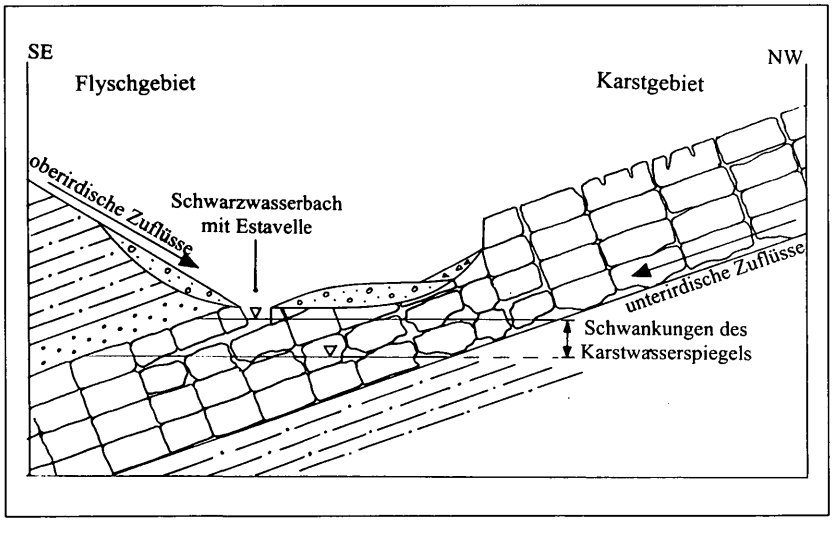


Abb. 23: Schematischer Querschnitt durch das Schwarzwassertal im Bereich der Estavelle. Der Schwarzwasserbach erhält oberirdische Zuflüsse aus dem Flyschgebiet, der Talgrundwasserleiter wird von unterirdischen Zuflüssen aus dem Karst gespeist. Die Estavelle stellt die Verbindung zwischen dem Schwarzwasserbach und dem Grundwasserleiter dar

Bei Niedrigwasser versinkt der Schwarzwasserbach, der von oberirdischen Zuflüssen von der orographisch rechten Talseite und aus dem Gebiet oberhalb der Bergsturzmasse gespeist wird, vollständig in der Estavelle, um in den Karstquellen auf der orographisch linken Talseite wieder zutage zu treten. Das Wasser wechselt also die Talseite. Zwischen der Resurgenz des Schwarzwasserbaches unterhalb

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

der Bergsturzmasse und der Estavelle versickert das Wasser des Schwarzwasserbaches diffus im Bachbett und gelangt so in den Karstgrundwasserleiter.

Bei Hochwasser erhält der Karstgrundwasserleiter mehr Zuflüsse aus dem Gottesackergebiet als er an die Quellen weiterleiten kann. Er ist dann überlastet, so daß Karstgrundwasser in der Estavelle zutage tritt. Die Estavelle ist also ein Hochwasserüberlauf des Karstsystems Gottesacker-Schwarzwassertal. Vermutlich verursachen die in der Gottesacker-Synklinale abfließenden Karstwässer, die zwischen der Estavelle und der Aubachquelle das Schwarzwassertal erreichen, einen Rückstau im Talgrundwasserleiter, der bewirkt, daß die Estavelle zur Quelle wird.

Da der Schwarzwasserbach oberhalb der Estavelle keine Zuflüsse aus dem Karst erhält, ist er auch nicht der Vorfluter des Gottesackers. Daher liegt auch im Schwarzwassertal seichter Karst vor.

Im unteren Schwarzwassertal herrschen artesisch gespannte Verhältnisse, da hier der Karstgrundwasserleiter in der abtauchenden Mahdtalsynklinale von wasserstauenden Leistmergeln bedeckt ist. Die neu entdeckte Grundquelle in der Breitach ist ein Leck in diesem artesischen System. Sie ist perennierend und schüttet etwa 140 l / s. Die Grundquelle in der Breitach ist der tiefste direkte Auslaß des gesamten Karstgebietes Gottesacker-Schwarzwassertal. Daher bildet die Breitach den Vorfluter dieses Karstgebietes. Die Sägebachquelle und die Bürgermeisterquelle sind die beiden höchstgelegenen perennierenden Karstquellen und bilden eine lokale Vorflutbasis. Daher kann das Schwarzwassertal unterstromig dieser Quellen als tiefer Karst bezeichnet werden.

Auch die Fuchslochquelle QF ist ein Hochwasserüberlauf des Karstsystems. Da sie noch höher als die Estavelle liegt, schüttet sie nur nach extrem starken Niederschlägen und fördert die in der Auensynklinale abfließenden Karstwässer.

Auch im oberen Schwarzwassertal bildet der Schrattenkalk einen zusammenhängenden Karstgrundwasserleiter, der sich unter der Bergsturzmasse bis ins untere Schwarzwassertal fortsetzt. Es ist anzunehmen, daß das Karstgrundwasser aus dem oberen Schwarzwassertal in den Karstquellen des unteren Schwarzwassertales zutage tritt. Diese Hypothese konnte durch einen kombinierten Markierungsversuch im September 1997 bestätigt werden (GOLDSCHEIDER, 1998b; SINREICH, 1998).

7.2 Einzugsgebiete der Karstquellen

Das Karstgrundwasser aus dem Mahdtal tritt in der Sägebachquelle wieder zutage, nicht aber in der Aubachquelle (SPÖCKER, 1961). Das Mahdtal wird also von der Sägebachquelle entwässert. Auch die Tracer, die auf dem Gottesacker (Uranin) und im Schwarzwassertal (Eosin) eingegeben wurden, konnten in der Sägebachquelle nachgewiesen werden. Dies bedeutet, daß diese Quelle nicht nur das Mahdtal entwässert, sondern auch einen tiefen Auslaß des gesamten Karstgebietes Gottesacker-Schwarzwassertal darstellt. Das Grundwasser aus dem Schwarzwassertal fließt also nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren unter dem Mahdtalbach hindurch, um auf der anderen Talseite aufzusteigen und in der Sägebachquelle zutage zu treten.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

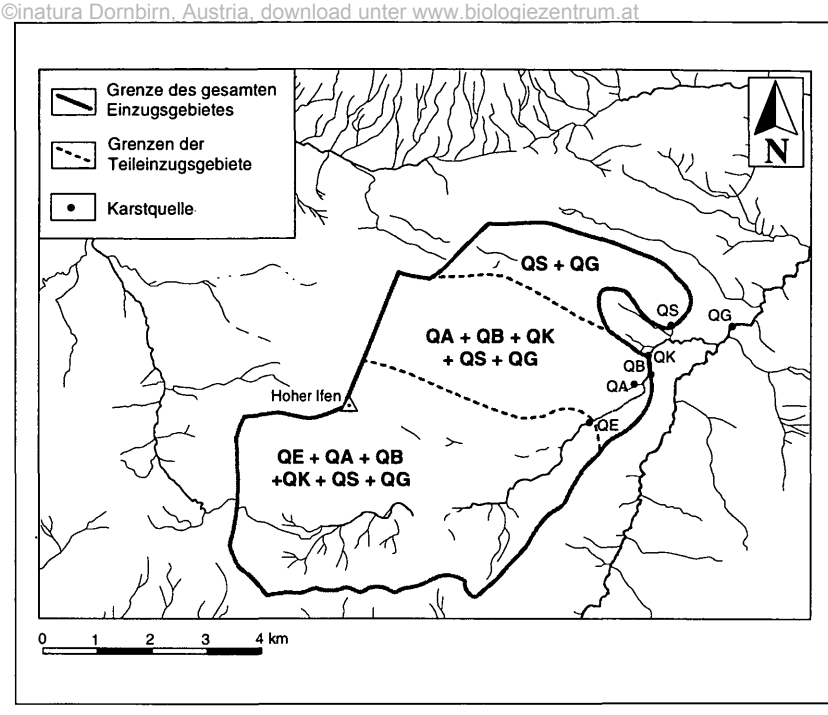


Abb. 24: Einzugsgebiete der Karstquellen: Ein großes, zusammenhängendes Einzugsgebiet wird durch Antiklinalen in Teileinzugsgebiete gegliedert. Bei Niedrigwasser und Versinkung an der Estavelle wird auch die orographisch rechte (südliche) Seite des Schwarzwassertales vollständig von den Karstquellen entwässert

Beide Tracer konnten in allen Karstquellen des Tales und im Schwarzwasserbach unterhalb der Estavelle nachgewiesen werden. Dies bedeutet, daß der Schrattenkalk im Untersuchungsgebiet einen großen, zusammenhängenden Karstgrundwasserleiter bildet. Die Aubachquelle, die Bürgermeisterquelle, die kleine Karstquelle bei Kesselschwand, die Sägebachquelle, die Grundquelle in der Breitach und bei Hochwasser auch die Estavelle entwässern also gemeinsam ein großes, zusammenhängendes Einzugsgebiet. Die nahezu identischen Wassertemperaturen und die großen hydrochemischen Ähnlichkeiten der Karstquellen bestätigen diesen Zusammenhang. Die Grenzen dieses gemeinsamen Einzugsgebietes folgen im Wesentlichen den Kammlinien der Bergumrandung des Schwarzwassertals und des Mahdtals. Auf dem flachen und kuppigen Gottesackerplateau ist diese Kammlinie, und damit auch die unterirdische Wasserscheide, nur schwer zu bestimmen.

Die Größe dieses gemeinsamen Einzugsgebietes verändert sich in Abhängigkeit vom Abfluß: Bei Niedrigwasser und Versinkung an der Estavelle bildet das gesamte Schwarzwassertal das Einzugsgebiet der Karstquellen. Bei Hochwasser, wenn die Estavelle zur Quelle wird, entwässern die Karstquellen im wesentlichen nur noch die orographisch linke Talseite, also den Gottesacker, während die rechte Talseite, also das Flyschgebiet, überwiegend oberirdisch vom Schwarzwasserbach entwässert wird. Oberhalb der Estavelle versickert aber auch bei Hochwasser ein Teil des Bachwassers im Karstgrundwasserleiter. Das gemeinsame Einzugsgebiet wird durch die Scheitellinien der Antiklinalen in Teileinzugsgebiete untergliedert:

- Die Grundquelle und die Sägebachquelle entwässern das gesamte Einzugsgebiet einschließlich des Mahdtals.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

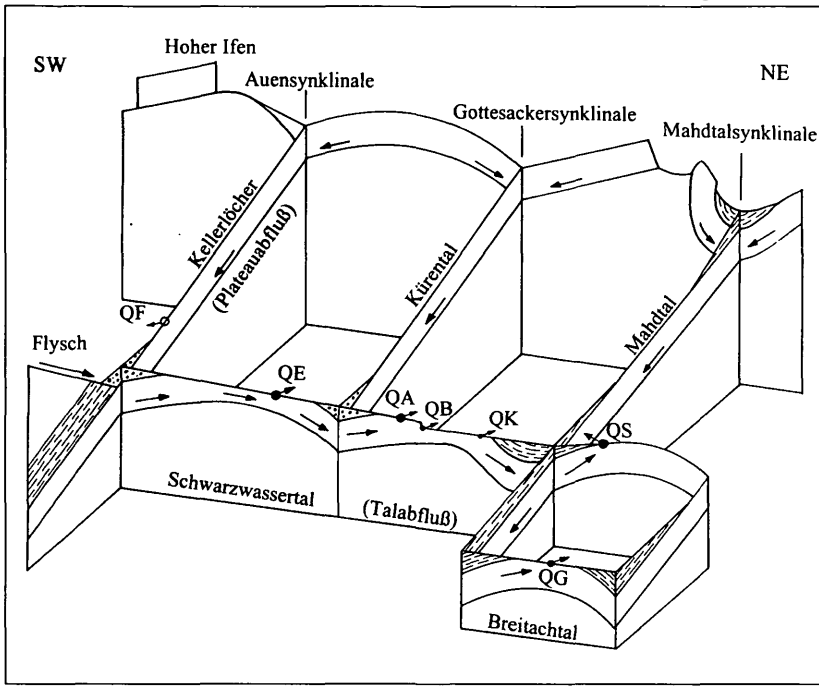


Abb. 25: Hydrogeologische Modellvorstellung des Untersuchungsgebietes (die Pfeile zeigen die Fließbewegung im Karstgrundwasserleiter): Die Synklinalen stellen bevorzugte Entwässerungsbahnen für die vom Gottesacker abfließenden Karstwässer dar (Plateauabfluß). Der im Schwarzwassertal unter den Flysch abtauchende Karstkörper sammelt diese Karstwässer (Talabfluß) und leitet sie an die Karstquellen (QA, QB, QK) weiter. Bei hohen Abflüssen wird auch die Estavelle (QE) zur Quelle, nach extrem starken Niederschlägen sogar das Fuchsloch (QF). Der Schwarzwasserbach selbst wird aus dem oberen Schwarzwassertal und von oberirdischen Zuflüssen aus dem Flyschgebiet gespeist. Das Grundwasser aus dem Schwarzwassertal fließt unter dem Mahdtal hindurch, um in der Sägebachquelle (QS) wieder zutagezutreten. Im unteren Schwarzwassertal und an der Breitach ist der Schrattenkalk von Leistmergeln überlagert. Dort, wo der Karstgrundwasserleiter von der Breitach angeschnitten wird, befindet sich die Grundquelle QG, die den tiefsten Auslaß des Karstsystems darstellt

- Die Aubachquelle und wahrscheinlich auch die Bürgermeisterquelle und die kleine Karstquelle bei Kesselschwand entwässern das gesamte Einzugsgebiet abzüglich des Mahdtals. Sie erhalten starke Zuflüsse von der Gottesacker-Synklinale. Die Antiklinale der oberen Gottesackerwände bildet also eine lokale Wasserscheide.
- Die Estavelle erhält wahrscheinlich keine Zuflüsse aus der Gottesacker-Synklinale. Sie entwässert daher nur die Auensynklinale und das obere Schwarzwassertal.

Das Einzugsgebiet der Estavelle ist also eine Teilmenge des Einzugsgebietes der Aubachquelle, das wiederum eine Teilmenge des gesamten, von der Sägebachquelle und der Grundquelle entwässerten Einzugsgebietes darstellt.

7.3 Fließgeschwindigkeiten

Die dominierende Abstandsgeschwindigkeit im Talgrundwasserleiter des Schwarzwassertales beträgt durchschnittlich 121 m / h, die maximale bis zu 174 m / h. Im seichten Hochkarst ist der Mittelwert der dominierenden Abstandsgeschwindigkeit größer als 224 m / h, als Höchstwert der maximalen Abstandsgeschwindigkeit wurden 331 m / h ermittelt. Nach MATTHESS & UBELL (1983) liegen die Fließgeschwindigkeiten im Karst meist in einem Intervall zwischen 18 und 360 m / h. Die hier festgestellten Geschwindigkeiten sind also sehr hoch und liegen an der Obergrenze des angegebenen Intervalls.

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

7.4 Beziehungen zwischen dem Karst und lokalen Porengrundwasserleitern

Die Ifenmulde ist ein eigenständiger Porengrundwasserleiter und erhält keine Zuflüsse aus dem Karst. Umgekehrt gelangt das Grundwasser aus der Ifenmulde letztlich vollständig in den Karstgrundwasserleiter.

Das Quartär bildet im Schwarzwassertal keinen zusammenhängenden Porengrundwasserleiter sondern gehört überwiegend der ungesättigten Zone an. Nur über wasserstauenden Lagen können lokal schwebende Grundwasserstockwerke auftreten. Letztlich gelangt aber alles im Talboden infiltrierte Wasser in den Karstgrundwasserleiter. Bei extremem Hochwasser ist es jedoch möglich, daß der Karstwasserspiegel sehr schnell stark ansteigt, so daß Karstwasser bis zur Oberfläche aufsteigt und in zahlreichen Quellen zutage tritt.

Oberhalb der nacheiszeitlichen Bergsturzmasse im oberen Schwarzwassertal versinkt der Schwarzwasserbach ganzjährig und vollständig; unterhalb befindet sich eine Quellgruppe (QR) mit starken Schüttungsschwankungen und einer maximalen Schüttungen von über 1 m^3 / s. Es ist offensichtlich, daß es sich hierbei um einen Wiederaustritt des Schwarzwasserbaches handelt. Nach langer Trockenheit fällt die Quellgruppe trocken. Dann sickert das Wasser des Schwarzwasserbaches vermutlich durch die Bergsturzmasse bis in den Karstgrundwasserleiter.

7.5 Mögliche Belastungen der Quellen

In den vergangenen Jahren wurden folgende Quellen durch die Einleitung von Abwässern in den ehemaligen Abwasserschacht der Bergstation Hahnenköpfle betroffen (in der Reihenfolge abnehmender Belastung): die Estavelle, die Aubachquelle, die Bürgermeisterquelle, die kleine Karstquelle bei Kesselschwand und die Sägebachquelle. Die Abwässer können die genannten Quellen nach 14 Stunden (Estavelle) bis 27 Stunden (Sägebachquelle) erreicht haben. Wie groß diese Belastung tatsächlich war, läßt sich nicht feststellen, da keine Daten über die eingeleiteten Abwässer vorliegen. Die Hausquelle der Ifen-Hütte wird nicht von den Abwässern der Bergstation belastet.

Es besteht kein Zweifel, daß der mit Fäkalien gefüllte Ladstattschacht in den Jahren nach 1975 die Aubachquelle und vermutlich auch alle anderen Karstquellen belastet hat. Auch heute noch macht sich der Einfluß des Fäkalkörpers durch hydrochemische Besonderheiten der Aubachquelle bemerkbar. Die Gehalte an Nitrat, Chlorid, Phosphat und Ammonium liegen allerdings deutlich unter den Grenzwerten.

8. Danksagung

Folgenden Personen möchte ich meinen Dank aussprechen:

Herrn Prof. Dr. H. Hötzl für die Vergabe dieses vielseitigen und schönen Themas, für viele fachliche Anregungen und für die Betreuung und freundliche Unterstützung meiner Arbeit.

Frau Dr. B. Reichert für die Betreuung meiner Arbeit.

Familie Fritz, deren Herzlichkeit und Gastfreundschaft mir einen ausgesprochen

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
schönen und angenehmen Aufenthalt im Kleinwalsertal ermöglichte. Insbesondere Herrn Tiburt Fritz, der mir in seiner Eigenschaft als Vorsitzender des Landschaftsschutz Kleinwalsertal vielfältige Unterstützung und zahlreiche Anregungen zukommen ließ und meine Arbeit mit stetem Interesse begleitet hat.

Der Ifen-Lift KG für die wertvolle Unterstützung bei der Durchführung des Tracerversuches.

Allen Mitgliedern des Landschaftsschutz Kleinwalsertal, die mir bei der aufwendigen Probennahme während des Markierungsversuches geholfen haben.

Familie Karl Keßler, die ihr Haus in den Tagen des Markierungsversuches als „Forschungsstation" zur Verfügung gestellt hat.

Frau Metka Petriç für die Hilfe bei der hydrochemischen Stichtagsbeprobung.

Frau Daniela Meyer für die freundliche Betreuung der Laborarbeit.

Der Studienstiftung des Deutschen Volkes und dem Landschaftsschutz Kleinwalsertal danke ich für die finanzielle Unterstützung meiner Diplomarbeit.

Für Informationen, Anregungen oder sonstige Unterstützung danke ich u.a. Frau Elke Triller, Herrn Dipl.-Geol. Johann Peter Orth, den Herren Dr. P. Starck, Dipl.-Ing. M. Weiß und Dipl.-Ing. F. Osterkorn vom Amt der Vorarlberger Landesregierung, den Herren Dipl.-Ing. H. Wirth und Dipl.-Ing. R. Grabher vom Landeswasserbauamt Bregenz, Herrn Dr. W. Krieg vom Landesmuseumsverein Vorarlberg und Herrn Dipl.-Geol Stefan Niggemann von der Speläogruppe Letmathe.

9. Verwendete Schriften und Karten

9.1 Schriften

BROGGI, M.F. (1987): Biotopinventar Vorarlberg-Teilinventar Kleinwalsertal.-Studie i.A. des Vorarlberger Landschaftspflegefonds; Bregenz (unveröff.).

COST-Action 65 (1995): Karst groundwater protection. Final report-Europ. Commission, Report EUR 16547 EN, 446 S.; Brüssel-Luxemburg.

CRAMER, K. (1959): Die Geologie des Mahdtales und der Karst des Gottesackergebietes. - Diplomarbeit TH München, 80 S.; München (unveröff.).

DVWK (1992): Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben, 128 / 1992: 36 S.; Hamburg, Berlin (Paul Parey).

ECKERT, M. (1902): Das Gottesackerplateau - Ein Karrenfeld im Allgäu - Studien zur Lösung des Karrenproblems. - Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschr. d. D. u. Ö. Alpenvereins, 1. Band-3. Heft; Innsbruck (Verl. d.D.u.Ö.AV.).

EISBACHER, G.H. (1991): Einführung in die Tektonik: 310 S.; Stuttgart (Enke).

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

GOLDSCHEIDER, N. (1996): Der kombinierte Markierungsversuch im Gebiet Gottesacker / Schwarzwassertal vom 20.09.1996. - Abschlußbericht, 24 S., 13 Abb., 1 Karte; Karlsruhe (unveröff.).

GOLDSCHEIDER, N. (1997): Hydrogeologische Untersuchungen im alpinen Karstgebiet Gottesacker und Schwarzwassertal (Allgäu / Vorarlberg).-Diplomarbeit Uni Karlsruhe (TH); Karlsruhe (unveröff.).

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
GOLDSCHEIDER, N (1998a): Der Ladstattschacht - tracerhydrologische Untersuchung einer organischen Altlast im alpinen Karst. – in: Schr.Angew.Geol. Karlsruhe. (Hrsg. CZURDA, K. & HÖTZL, H.), 50, 18 S.; Karlsruhe (in Druck).
GOLDSCHEIDER, N (1998b): Hydrogeological characteristics of folded alpine karst systems exemplified by the Gottesacker Plateau (German-Austrian Alps). – Acta Carsologica, 12 S.; Ljubljana, Slovenia (in Druck).
HÄCKEL, H. (1990): Meteorologie (2. Aufl.). - UTB 1338: 402 S., 143 Abb., 25 Tab.; Stuttgart (Ulmer).
HÖTZL, H. (1992): Karstgrundwasser. In: KÄSS, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik, Lehrb. d. Hydrogeol. Bd.9: 374-406.; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
HÖTZL, H. (1996): Grundwasserschutz in Karstgebieten. - Grundwasser 1 / 1: 5-11; Berlin, Heidelberg (Springer-Verlag).
HUTH, J. (1998): Geologisch-tektonische Kartierung und hydrochemische Untersuchungen im nordwestlichen Gottesackergebiet (Vorarlberg/Bayern). – Diplomarbeit Uni Karlsruhe (TH); Karlsruhe (unveröff.).
JENNINGS, J.N. (1985): Karst Geomorphology: 281 S.; Oxford (Basil Blackwell).
KÄSS, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik.- Lehrbuch der Hydrogeologie (Hrsg.: MATTHESS, G.), Bd. 9: 519 S.; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
KRIEG, W. (1969): Seichter Hochkarst am Hohen Ifen - ein Beispiel von allgemeiner Bedeutung.-Abh. 5. Internat. Kongreß für Speläologie, Bd. 1; Stuttgart.
MATTHESS, G. & UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie-Grundwasserhaushalt.- Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 1.:438 S.; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
MATTHESS, G. (1994): Die Beschaffenheit des Grundwassers (3. Ausg.).-Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 2.:499 S.; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
NIGGEMANN, S. (1997): Das Karstgebiet Gottesacker-Hochifen (Allgäuer Alpen) - Ein geologisch-speläologischer Überblick. - Erscheint 1997 in: Speläol. Jahrb.-Verein f. Höhlenkunde in Westfalen: 7 Abb., 1 Tab.; Iserlohn.
ORTH, J.P. (1984): Entwässerung synklinaler Karstkörper in den Bayerischen Alpen.-Akten 7. nat. Kongr. Höhlenforsch. Schwyz 1982 (Suppl. No. 11 à „Stalactite"): S. 185-204, 1 Abb.; Genéve (Schweizer. Ges. Höhlenforsch. u. Komm. Höhlenforsch. schweizer. naturforsch. Ges.) 1984.
ORTH, J.P. (1992): Falten- und Schuppenstrukturen als Leitelemente der Karstentwässerung in den Bayerischen Alpen. - Laichinger Höhlenfreund 27 (1): 23-39, 2 Abb.; Laichingen.
REISIGL, H. & KELLER, R. (1994): Alpenpflanzen im Lebensraum.; Stuttgart, Jena, New York (Gustav Fischer Verlag).
REISIGL, H (1980): Alpenblumen; Innsbruck (Pinguin-Verlag).
RICHTER, D. (1984): Allgäuer Alpen. - Sammlung Geologischer Führer, Bd. 77; Berlin, Stuttgart (Gebr. Bornträger).
RICHTER, D. (1992): Allgemeine Geologie (4. Aufl.); Berlin, New York (W. de G.).
SCHMIDT-THOMÉ, P. (1960): Zur Geologie und Morphologie des Ifengebirgsstockes (Allgäu). - Erdkunde 1960: S. 181-195, 8 Abb..

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at
SCHMIDT-THOMÉ, P. (Hrsg.) (1961): Das Hölloch bei Riezlern im Kleinen Walsertal (Allgäu-Vorarlberg) - eine karstkundliche Monographie. - Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, Heft 18: 116 S.; Innsbruck (Universitätsverlag Wagner).
SCHMIDT-THOMÉ, P. (1974): Geologisch-morphologische Erläuterung.-Landformen im Kartenbild, Kartenprobe 3: Alpiner Karst auf dem Gottesackerplateau - Arbeitskreis „Topographisch-Geomorphologische Kartenproben 1:25 000: S.11-16.; Braunschweig (Westermann).
SCHOLZ, H. (1995): Bau und Werden der Allgäuer Landschaft: 305 S., 134 Abb., 47 Tafeln; Stuttgart (Schweizerbart)
SINREICH, M. (1998): Hydrogeologische Untersuchungen im oberen Schwarzwassertal (Vorarlberg) - Wechselwirkungen zwischen Bergsturzmasse, Karstgrundwasserleiter und Flyschgebiet. – Diplomarbeit Uni Karlsruhe (TH); Karlsruhe (unveröff.).
SONTHEIMER, H., SPINDLER, P., ROHMANN, U. (1986): Wasserchemie für Ingenieure.-Schrift der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Universität Karlsruhe (TH): 489 S.; Karlsruhe.
SPÖCKER, R.G. (1961): Das Hölloch als geographisches Element.-Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, Heft 18: 33-53; Innsbruck (Universitätsverlag Wagner).
SPÖTTL, M. (1988): Tatort Alpen: 215 S.; Göttingen (Echo Verlag).
TOMSU, C. (1998): Zur Hydrogeologie des Karstes zwischen Hochifen und Subersach, Hinterer Bregenzerwald, Vorarlberg. – Diplomarbeit Uni Karlsruhe (TH); Karlsruhe (unveröff.).
TRIMMEL, H. (1955): Das Schneckenloch bei Schönebach. - Karst und Höhlen in Vorarlberg. - Vorarlberger Landesmuseumsverein. - Karst- und Höhlenkundlicher Ausschuß:13-28.; Dornbirn 1988.
WAGNER, G. (1950): Rund um Hochifen und Gottesackergebiet. Öhringen (Verlag der Hohenloheschen Buchhandlung Ferdinand Rau).
WHITE, W.B. (1988): Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains. 447 S.; New York, Oxford (Oxford University Press).
WILHELMY, H. (1992): Geomorphologie in Stichworten -III. Exogene Morphodynamik - Karstmorphologie (5. Aufl.): 176 S.; Berlin, Stuttgart (Hirt).
WYSSLING, (1986): Der frühkretazische Schelf in Vorarlberg und im Allgäu - Stratigraphie, Sedimentologie und Paläogeographie. – Jb. Geol. B.-A., 129/1, 161-265; Wien.
ZACHER, W. (1973): Das Helvetikum zwischen Rhein und Iller (Allgäu-Vorarlberg). - Geotekt. Forsch., Bd.44: 1-74; Stuttgart.

9.2 Karten

Geologische Karte der Republik Österreich 1:50'000, Blatt 113 Mittelberg. / W. Zacher.- Geologische Bundesanstalt; Wien (1990).
Geologische Karte von Bayern 1:100'000, Blatt 670 Oberstdorf (2. Aufl). / W. Zacher.-Bayerisches Geologisches Landesamt; München (1985). Mit 12 Profilen.
Hydrographisch-Morphologische Karte der Bayerischen Alpen 1:25'000, Blatt 8626 Hoher Ifen. / G. Bunza.-Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft; München (1979).

©inatura Dornbirn, Austria, download unter www.biologiezentrum.at

Topographisch-Geomorphologische Kartenprobe 1:25'000, VI / 3: Alpiner Karst auf dem Gottesackerplateau und Bergsturz, Hoher Ifen, Allgäuer Alpen. / Hofmann, W. & Louis, H. (Hrsg.), Brandstätter, L. (Bearbeiter); Westermann (1974).
Topographische Karte 1:25'000, Blatt 8626 Hoher Ifen.-Bayerisches Landesvermessungsamt; München (1990).
Topographische Karte 1:25'000, Blatt 8627 Einödsbach.-Bayerisches Landesvermessungsamt; München (1991).
Topographische Karte 1:50'000, Allgäuer Alpen.-Bayerisches Landesvermessungsamt; München (1994).

Anschrift des Autors:
Dipl.-Geol. Nico Goldscheider
Institut für Angewandte Geologie (AGK)
Hydrogeologie Prof. Dr. H. Hötzl
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstr. 12
D-76128 Karlsruhe

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Vorarlberger Naturschau - Forschen und Entdecken

Jahr/Year: 1998

Band/Volume: 4

Autor(en)/Author(s): Goldscheider Nico

Artikel/Article: Hydrogeologische Untersuchungen im alpinen Karstgebiet Gottesacker und Schwarzwassertal (Allgäu / Vorarlberg). 247-294