

Hydrogeologie der alpinen Karstlandschaften Vorarlbergs

von Nico Goldscheider & Nadine Göppert

Zu den Autoren

Dr. Nico Goldscheider, geboren 1969, hat an der Universität Karlsruhe Geologie studiert, 1997 das Diplom und 2002 seine Promotion über die Hydrogeologie alpiner Karstsysteme mit Auszeichnung abgeschlossen. Er hat bereits drei Karstlandschaften Vorarlbergs untersucht: Hochifen-Gottesacker, Winterstauden und (mit Nadine Göppert) Hochgrat-Lecknertal. Seit 2002 arbeitet er als Oberassistent am Zentrum für Hydrogeologie der Universität Neuchâtel (CHYN) in der Schweiz und beschäftigt sich weiterhin mit Karst und Markierungsversuchen. (<http://capella.unine.ch/chyn/index.html>)

Nadine Göppert, geboren 1977, hat an der Universität Karlsruhe Geologie studiert, im Rahmen ihrer Diplomarbeit die Karsterscheinungen im Gebiet Hochgrat-Lecknertal untersucht und im Frühjahr 2002 mit Auszeichnung abgeschlossen. Seitdem ist sie Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Angewandte Geologie Karlsruhe (AGK) und befasst sich im Rahmen ihrer Promotion mit Karstsystemen und Tracertechnik. (<http://www.agk.uni-karlsruhe.de/>)

Abstract

This review gives an overview of alpine karst systems in the state of Vorarlberg in Western Austria and presents each one example from the four main tectonic-stratigraphic facies zones of the Alps that outcrop in this region: the East Alpine, Penninic, Helvetic and Molasse zone. Karst systems developed in many different rock types (limestone, dolomite, gypsum, conglomerate) from different geological times (Triassic to Tertiary) and in different altitudes and thus show different characteristics. Some karst landscapes in Vorarlberg show spectacular karren-fields and large caves, while others are characterised by less developed karst features, often covered by soil and vegetation. There is all kind of transition between conduit, fissured and porous carbonate aquifers. In all the described karst systems, stratification and alpine fold and fault tectonics influence the underground drainage pattern. The hydrogeological characteristics of some karst systems were investigated in great detail using a wide range of methods, above all tracer tests, whilst little is known about some other karst systems.

Key words: Vorarlberg, alpine karst systems, hydrogeology, carbonate aquifers, tracer tests

**VORARLBERGER
NATURSCHAU
15
SEITE 41–62
Dornbirn 2004**



Zusammenfassung

Dieser Beitrag gibt einen Überblick der alpinen Karstsysteme Vorarlbergs und präsentiert je ein Beispiel aus jeder der vier tektonisch-stratigraphischen Fazieszonen der Alpen, die in dieser Region auf engstem Raum nebeneinander anstehen: Ostalpin, Penninikum, Helvetikum und Molasse. In Vorarlberg gibt es Karstsysteme in verschiedenen Gesteinsarten (Kalkstein, Dolomit, Gips, Konglomerat) aus unterschiedlichen geologischen Zeiten (Trias bis Tertiär) und in allen Höhenlagen. Entsprechend groß ist die landschaftliche und hydrogeologische Vielfalt. Einige Karstlandschaften zeichnen sich durch spektakuläre Karrenfelder und große Höhlen aus, andere zeigen weniger ausgeprägte Karstformen, die oft durch Boden und Vegetation bedeckt sind. Es lassen sich alle Übergänge zwischen verkarsteten, geklüfteten und porösen Carbonatgesteinen beobachten. In allen beschriebenen Karstsystemen haben die Schichtung und die alpine Falten- und Bruchtektonik einen entscheidenden Einfluss auf die unterirdische Entwässerung. Die Hydrogeologie einiger Vorarlberger Karstsysteme wurde durch die kombinierte Anwendung unterschiedlicher Methoden, v.a. Markierungsversuche, detailliert untersucht, während über andere bis heute nur recht wenig bekannt ist.

1. Bedeutung und Verletzlichkeit von Karstgrundwasser

Grundwasser aus Karstlandschaften gehört zu den wichtigsten Süßwasserressourcen der Menschheit. Nach Schätzungen bezieht etwa 25 % der Weltbevölkerung ihr Trinkwasser aus dem Karst (COST 65, 1995). Der Begriff *Karst* (oder *Kras*) bezeichnet ursprünglich eine Landschaft im Hinterland der Stadt Triest an der Adria, die aus Kalkstein besteht und sich durch charakteristische Geländeformen, Höhlen und spezielle hydrologische Eigenschaften auszeichnet. Nach dieser Typlokalität werden alle Landschaften, in denen ähnliche Phänomene anzutreffen sind, als Karstlandschaft bezeichnet.

Kalkstein bildet sich meist in flachen, tropischen Meeren aus den Resten abgestorbener Organismen, wie Muscheln, Seelilien, Korallen oder Kalkalgen. Durch Versenkung in die Tiefe und erhöhte Temperaturen werden diese Ablagerungen zu hartem Gestein verfestigt; durch Hebung und geologische Vorgänge gelangt der Kalkstein an die Oberfläche. Chemisch-mineralogisch gesehen, besteht Kalkstein aus Calcit, also Calciumcarbonat (CaCO_3). Kalkstein ist meist von feinen Klüften und Trennfugen durchzogen, in die versickerndes Regenwasser eindringen kann. Dieses enthält natürliche Säuren, v.a. Kohlensäure, das ist in Wasser gelöstes Kohlendioxid (CO_2) aus der Atmosphäre und dem Boden. Die Säure greift den Kalkstein chemisch an. So entstehen ober- und unterirdische Lösungshohlformen, ein Vorgang der als Verkarstung bezeichnet wird. Kohlensäure greift aber auch andere carbonatische Gesteine an, wie Dolomit, Marmor und carbonatische Konglomerate. Gips, Anhydrit und Salz sind ebenfalls leicht löslich, auch wenn dort andere Prozesse wirksam sind. All diese Gesteine sind daher verkarstungsfähig.

In Karstlandschaften versickert oft das gesamte Regen- und Schmelzwasser, das nicht durch Verdunstung verloren geht, durch den Boden und über Spalten und Schächte in die Tiefe. Daher sind solche Landschaften oberirdisch abflusslos und wirken oft karg und trocken. Im Untergrund sind dagegen oft bedeutende Wassermengen gespeichert, die über ein Netzwerk aus Röhren, Spalten und Höhlen zu großen Quellen fließen. Typische oberirdische Geländeformen im Karst sind *Karren* (Lösungsrinnen und -spalten), *Karrenfelder* (Felsflächen mit Karren), *Dolinen* (Lösungs- oder Einsturztrichter), *Trockentäler* (Täler ohne oberirdischen Abfluss) und *Poljen* (große abflusslose Hohlformen mit ebenem Talboden); unterirdische Karstformen umfassen alle Arten von Hohlräumen (FORD & WILLIAMS 1989).

In der Hydrogeologie gilt jede Gesteinsformation als verkarstet, in der ein Teil der Klüfte und Trennfugen durch chemische Lösung erweitert wurden, auch wenn an der Geländeoberfläche keine typische Karstlandschaft zu erkennen ist. Ein verkarsteter Gesteinskörper kann Grundwasser speichern und weiterleiten und wird daher als *Karstgrundwasserleiter* oder *Karstaquifer* bezeichnet. Karstaquifere reagieren oft sehr schnell und heftig auf hydrologische Ereignisse; allgemein bekannt ist der dramatische Anstieg des Wasserspiegels in Höhlen, der schon vielen Höhlentouristen zum Verhängnis wurde. Viele Karstquellen zeigen ebenfalls starke Schwankungen: in kalten Wintern und sommerlichen Dürreperioden trocknen sie aus; während der Schneeschmelze oder nach Starkniederschlägen kann ihre Schüttung binnen Stunden auf viele 100 L/s oder sogar etliche m³/s ansteigen. Die größten Karstquellen schütten bei Hochwasser weit über 100 m³/s.

Aufgrund der geschilderten Eigenschaften sind Karstaquifere besonders verletzlich (vulnerabel) gegenüber Schadstoffeinträgen. Schadstoffe aller Art können durch dünne Böden, offene Spalten und Schächte ins Grundwasser eindringen und sich dort rasch und weitgehend ungehindert ausbreiten, ohne dabei nennenswert gefiltert oder abgebaut zu werden. Daher kommt der hydrogeologischen Erforschung und dem Schutz des Grundwassers im Karst eine besondere Bedeutung zu (DREW & HÖTZL 1999, ZWAHLEN 2004).

Viele Gebiete der Alpen bestehen aus Kalkstein, Dolomit oder anderen löslichen Gesteinen und sind daher als Karstlandschaften anzusprechen: die Französischen Kalkalpen, weite Teile der nördlichen Schweizer Alpen, die Nördlichen Kalkalpen in Deutschland und Österreich, die Südlichen Kalkalpen einschließlich der Dolomiten, sowie die Slowenischen Alpen und andere Gebirgsgruppen. Entsprechend groß ist die Bedeutung für die Trinkwasserversorgung: Österreich und Slowenien gewinnen beispielsweise etwa 50 % ihres Trinkwassers aus Karstgebieten. Große Städte im Alpenraum wie Wien, Innsbruck und Salzburg werden überwiegend mit Karstwasser versorgt (COST 65, 1995).

In Vorarlberg besteht etwa ein Drittel der Landesfläche aus verkarstungsfähigen Gesteinen (KRIEG 1988). Zahlreiche Gemeinden beziehen einen Teil ihres Trinkwasser aus Karstquellen, z. B. Hittisau, Bezau, verschiedene Ortschaften im Großwalsertal, Nenzing, Marul, St. Anton im Montafon, Lech und viele mehr. Die Erforschung der Karstlandschaften hat daher für Vorarlberg auch eine ganz praktische Bedeutung.

Dieser Artikel gibt einen Überblick der Karstsysteme Vorarlbergs und beschreibt je ein Beispiel aus jeder geologischen Baueinheit. Die Beispiele aus der Molassezone und dem Helvetikum beruhen überwiegend auf eigenen Arbeiten aus dem Zeitraum 1996 bis 2003, während die Beispiele aus dem Ostalpin und Penninikum der Literatur entnommen wurden. Hier sind ab 2004 eigene Untersuchungen geplant.

2. Überblick der Geologie und Karstsysteme Vorarlbergs

Vorarlberg ist geologisch ein besonders vielfältiger Raum. Vier Baueinheiten der Alpen sind dort auf engstem Raum anzutreffen. Von Süd nach Nord sind dies das Ostalpin, das Penninikum, das Helvetikum und die Molasse-Zone. Diese Einheiten wurden zu unterschiedlichen Zeiten räumlich nebeneinander gebildet und während der Gebirgsbildung von Süd nach Nord als Decken übereinander geschoben (COWARD & DIETRICH 1989). In all diesen Baueinheiten sind Karstlandschaften anzutreffen, die sich hinsichtlich ihres landschaftlichen Erscheinungsbildes und ihrer hydrogeologischen Eigenschaften, sowie hinsichtlich Größe, Bedeutung und Bekanntheitsgrad stark unterscheiden (*Abb. 1*).

Die südlichste Zone, die im Deckenstapel der Alpen am höchsten liegt, ist das **Ostalpin**. Es nimmt etwa die Hälfte der Landesfläche Vorarlbergs ein und besteht aus zwei völlig unterschiedlichen Gesteinseinheiten: Allgäu- und Lechtaldecke einerseits und Silvretta-Decke andererseits (OBERHAUSER 1998). Die Silvretta-Decke besteht aus kristallinen Gesteinen, vor allem Glimmerschiefer, Gneis und Amphibolit. Allgäu- und Lechtaldecke bauen in Vorarlberg weite Teile des Rätikons und Lechquellengebirges auf. Sie bestehen aus Sedimentgesteinen aus dem gesamten Erdmittelalter (Mesozoikum) und sogar aus dem jüngeren Erdaltertum: Perm, Trias, Jura und Kreide. Es dominieren mächtige Kalkstein- und Dolomitfolgen, daneben kommen auch Sandstein, Evaporite (Gips), Mergelkalke, Tonschiefer, Konglomerate und Brekzien vor. Die wichtigsten Karbonatgesteine im Vorarlberger Ostalpin sind Hauptdolomit und Plattenkalk aus der Trias.

Der Hauptdolomit ist zwar ein wichtiger Gipfelbildner, aber nur mäßig verkarstungsfähig. Hier lassen sich Übergänge zwischen Kluft- und Karstaquiferen beobachten (Spaltenkarst). Höhlen sind im Hauptdolomit eher selten und meist nur recht klein; auch Karren und andere Karstformen sind wenig ausgeprägt. Quellen, die aus Hauptdolomit entspringen, zeichnen sich oft durch relativ geringe Schwankungen der Schüttung und Wasserqualität aus. Der Plattenkalk baut dagegen Landschaften mit ausgeprägten Karstformen auf, beispielsweise das Gebiet um den Formarinsee (siehe *Kapitel 3.1*). Zudem gibt es im Ostalpin Vorarlbergs kleinräumigen aber eindrucksvollen Gipskarst in den Raibler Schichten (Trias): Das Becken des Lünensees entstand durch Gipsauslaugung; zwischen Lünensee und Zimbaspitze sind große Dolinen in Gips zu beobachten; bekannt sind auch die Gipslöcher bei Lech, sowie die Trübbachhöhle bei Marul, die längste Gipshöhle der Alpen (KRIEG 1988).

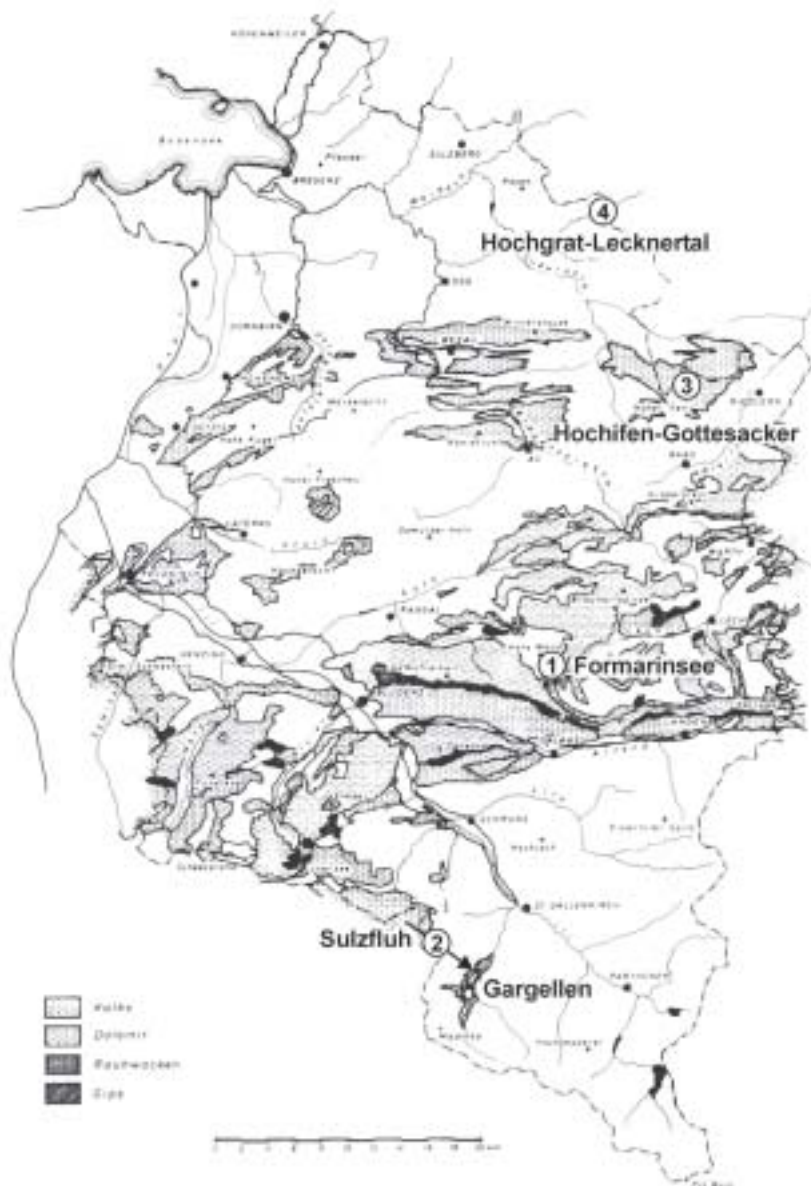


Abb. 1: Karstgebiete in Vorarlberg und Lage der in Kapitel 3 beschriebenen Testgebiete (KRIEG 1988, ergänzt)

Weiter nördlich und tiefer im Deckenstapel folgt das **Penninikum** und das Ultrahelvetikum. Das Penninikum besteht in Vorarlberg aus zwei völlig unterschiedlichen Zonen: Flysch und Sulzfluhdecke. Der Flysch besteht überwiegend aus Sandstein, Tonstein und Mergel, untergeordnet auch aus Kalkstein (z.B. Piesenkopfschichten). Hydrogeologisch wirkt der Flysch meist als Grundwasserstauer

und es dominiert oberflächlicher Abfluss. Bedeutende Karstphänomene sind nicht bekannt; möglicherweise sind aber einzelne Kalkbänke verkarstet.

Ganz anders die Sulzfluhdecke, die nur in einer schmalen Zone im Grenzbereich zu Graubünden aufgeschlossen ist. Sie besteht überwiegend aus dem sehr reinen und daher extrem verkarstungsfähigen Sulzfluhkalk des Oberen Jura, der einige markante Gipfel aufbaut, darunter das Karstmassiv der Sulzfluh (siehe *Kapitel 3.2*).

Nördlich schließt die etwa 15 km breite Zone des **Helvetikums** an, welches weite Teile des Bregenzerwaldes bis hin zum Kleinwalsertal aufbaut. Es sind überwiegend Gesteine aus der Kreidezeit aufgeschlossen; nur Kanisfluh und Mittagsfluh bestehen aus Gesteinen der Jurazeit. Das wichtigste Karstgestein und gleichzeitig der wichtigste Höhlenbildner im Helvetikum ist der Schrattenkalk (Kreide); weitere wichtige verkarstungsfähige Einheiten sind der Örfli-Kalk (Kreide) und der Quintner Kalk (Jura).

Die größte, spektakulärste und am besten untersuchte Karstlandschaft Vorarlbergs ist das Hochifen-Gottesacker Gebiet, wo der Schrattenkalk in Form von großflächigen, vegetationsarmen Karrenfeldern aufgeschlossen ist (siehe *Kapitel 3.3*). Die weiter westlich liegenden Karstgebiete wirken auf den ersten Blick weniger eindrucksvoll. Der Gebirgszug der Winterstaude bei Bezau zeigt beispielsweise nur wenige, meist von Boden und Vegetation bedeckte Karstformen. Hydrogeologisch ist dieses Gebiet aber sehr interessant, da dort zwei Karstaquifere miteinander in Verbindung stehen: Örfli-Kalk und Schrattenkalk. Wässer, die im Örfli-Kalk versickern, fließen über Störungen durch die Drusbergmergel in den Schrattenkalk. Durch einen kombinierten Markierungsversuch konnte eine Verbindung von einer Schwinde südlich der Winterstaude, unter dem Talraum von Bezau hindurch bis zu einer Quelle an der Bregenzerach belegt werden (GOLDSCHIEDER et al. 2001). Die Jura-Gesteine der Kanisfluh und Mittagsfluh wurden bisher noch nicht näher untersucht. Aus den nördlichen Schweizer Alpen ist jedoch bekannt, dass der Quintner Kalk oft einen voll entwickelten Karstaquifer bildet. Die Karrenfelder und Naturschächte im Quintner Kalk der Mittagsfluh sind ähnlich eindrucksvoll, wie diejenigen auf dem Gottesacker (WAGNER 1950).

Nördlich des Helvetikums folgt ein weiterer schmaler Streifen aus Flysch. Dieser wurde während der Gebirgsbildung als Decke über das Helvetikum geschoben und hat dieses bedeckt. Später wurde das Helvetikum gehoben und der Flysch weitflächig erodiert.

Der nördlichste Teil Vorarlbergs gehört zur **Molasse-Zone**. Dabei handelt es sich um das ehemalige nördliche Vorlandbecken der Alpen. Es bildete sich im Oligozän und Miozän und nahm den Abtragungsschutt des sich hebenden Gebirges auf. Die Sedimente wurden von Flüssen aus den Alpen ins Vorland transportiert und dort in großen Schwemmfächern abgelagert. Daher findet sich das größte Material in Alpennähe. In Vorarlberg kann man zwei Schwemmfächer unterscheiden: den Pfänderfächer im Westen (Bodensee-Schüttung) und den Hochgrat-Adelegg-Fächer (Hochgrat-Adelegg-Schüttung) im Osten (SCHOLZ 2000). Der südlichste Teil der Molasse wurde im Zuge der alpinen Gebirgsbildung gefaltet und auf den weiter nördlich liegenden Bereich geschoben. Man

unterscheidet daher Vorlandmolasse und Faltenmolasse. Die dominierenden Gesteine in der Faltenmolasse sind Konglomerate, besonders im Bereich der ehemaligen Schwemmfächer. Daneben kommen auch Sandsteine und Mergel vor. Da die Konglomerate oft sehr carbonatreich sind, sind sie verkarstungsfähig. Karstphänomene in der Faltenmolasse wurden früher jedoch meist übersehen. Tatsächlich lassen sich dort aber zahlreiche Karstformen beobachten (SCHOLZ & STROHMENGER 1999). Hydrogeologische Untersuchungen liegen bisher nur für das Gebiet Hochgrat-Lecknertal östlich von Hittisau vor (siehe *Kapitel 3.4*).

3. Beispiele für Karstsysteme in den vier Baueinheiten

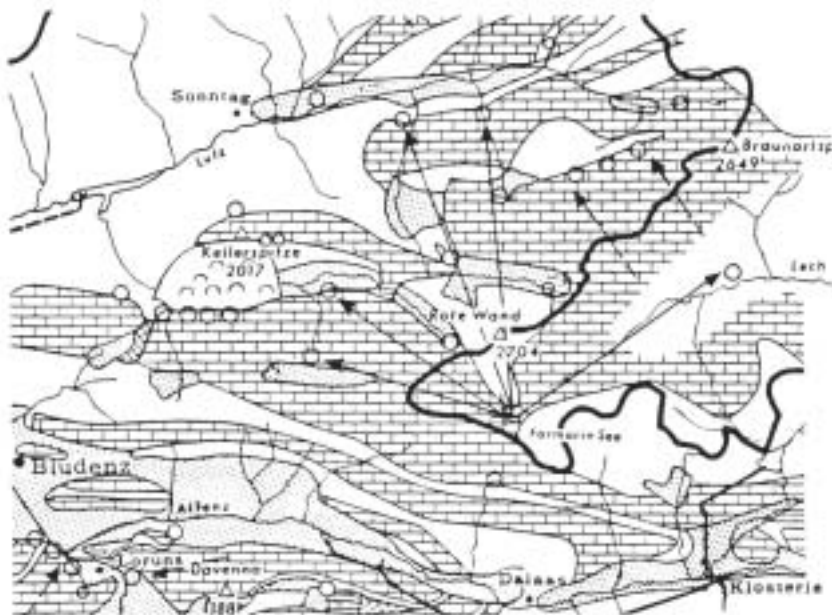
3.1 Ostalpin: Formarinsee

Weite Teile des Rätikons, des Lechquellengebirges und anderer Gebirgsgruppen gehören zur ostalpinen Allgäu- und Lechtaldecke. Die wichtigsten Karbonatgesteine sind Hauptdolomit und Plattenkalk aus der Trias. Eine eindrucksvolle Karstlandschaft aus Plattenkalk ist das Gebiet rund um den Formarinsee (1830 m) südlich der Roten Wand (2704 m) im Lechquellengebirge (*Abb. 1*). Der Formarinsee ist oberirdisch abflusslos und entwässert über Schwinden in den verkarsteten Plattenkalk (*Abb. 2*). In den umgebenden Tälern befinden sich zahlreiche Karstquellen. Aufgrund von Markierungsversuchen mit Sporen wurde hier ein radial divergierender Grundwasserabstrom von den Schwinden am Formarinsee zu den Quellen westlich, nördlich und östlich der Roten Wand postuliert (ZÖTL 1957, 1958). Der Öffnungswinkel der unterirdischen Fließwege beträgt etwa 130° (*Abb. 3*). Leider liegen die Versuchsergebnisse nur in Form unveröffentlichter Berichte vor.



Abb. 2: Der Formarinsee südlich der Roten Wand ist oberflächlich abflusslos und entwässert über Schwinden in den verkarsteten Untergrund.

Abb. 3: Ergebnisse der Sporentriftversuche am Formarinsee und daraus abgeleitetes radiales Entwässerungsmuster (LOCKER 1988; nach ZÖTL 1957, 1958). Die Autoren regen eine Überprüfung der Versuchsergebnisse mit modernen Methoden an.



Karstentwässerung vom Lech ins Illgebiet



Ein derart weit aufgefächertes radiales Entwässerungsmuster ist in Karstsystemen zwar durchaus möglich, hydrogeologisch aber eher die Ausnahme. Auch im Dachsteingebiet wurde – ebenfalls von ZÖTL (1961) und aufgrund von Sporentriftversuchen – eine radiale Entwässerung nach allen Seiten postuliert. Später wurden die Versuche mit Fluoreszenztracern wiederholt und das postulierte Entwässerungsmuster dadurch eindeutig widerlegt. So konnte BAUER (1989) zeigen, dass das Dachsteinmassiv dem Schichtfallen folgend recht einheitlich nach Norden hin entwässert. HERLICSKA et al. (1995) haben rekonstruiert, dass die positiven Sporennachweise an nahezu allen Quellen rund um das Dachsteingebiet, auf die Zötl sich stützt, oft nur die Folge unsauberer Arbeitsweise waren. Für die Eingabe der Sporen und die Probenahme wurde teils das selbe Personal und die selben Rucksäcke verwendet. Dadurch kamen die Sporen gewissermaßen «zu Fuß» von der Eingabestelle zu den Probenahmestellen. Es wäre daher interessant, auch die Ergebnisse der Sporentriftversuche am Formarinsee durch moderne Markierungsversuche zu überprüfen.

3.2 Penninikum: Sulzfluh-Gargellenfenster

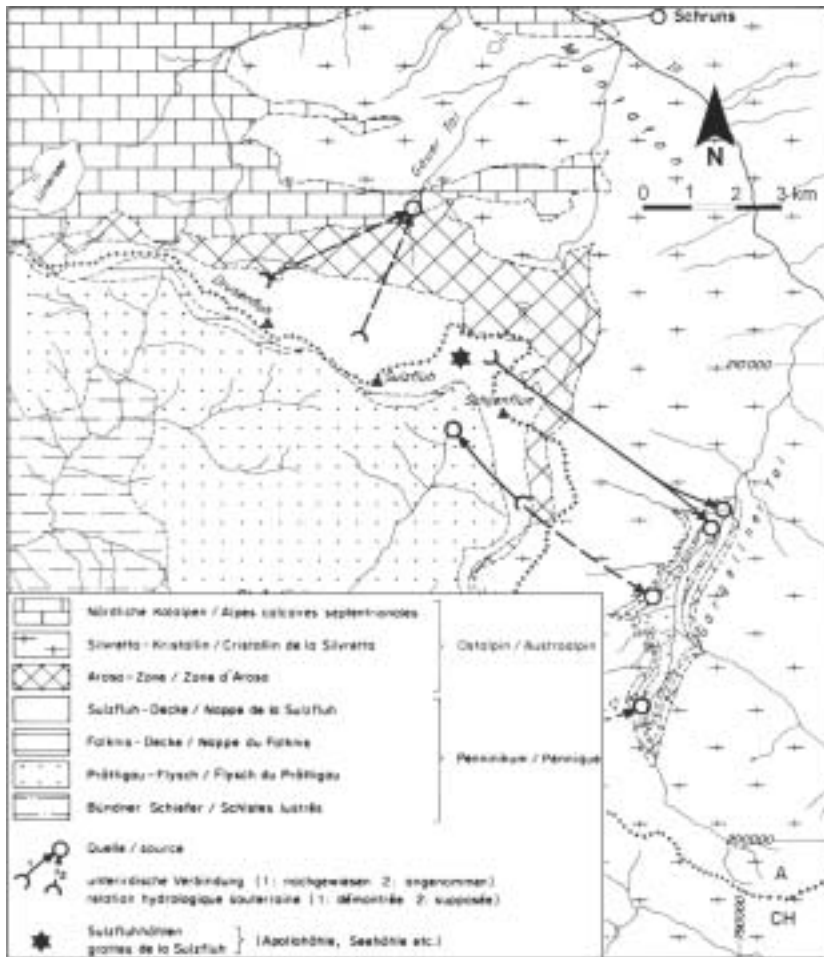
Die Sulzfluhdecke ist in einer schmalen Zone im Grenzbereich zwischen Vorarlberg und Graubünden aufgeschlossen und baut dort Drusenfluh (2827 m), Drusentürme (2830 m), Sulzfluh (2818 m), Schijenflue (2627 m) und einige andere Gipfel auf (Abb. 1, 4 und Abb. 5). Das dominierende Gestein ist der chemisch und mineralogisch sehr reine und daher extrem verkarstungsfähige Sulzfluhkalk, ein Riffkalk aus dem Oberen Jura. Seine Mächtigkeit wurde durch drei- bis vierfache tektonische Stapelung von ursprünglich etwa 200 m auf über 600 m erhöht. In den senkrechten Südwänden von Drusen- und Sulzfluh, sowie in der Schijenflue-Westwand ist dieses Schichtpaket in fast voller Mächtigkeit zu erkennen. Die Sporerplatte am Großen Drusenturm und das nach Nordosten geneigte Gipfelplateau der Sulzfluh sind freiliegende Gleitflächen in diesem Schichtpaket. Die Oberfläche des etwa 1 km² großen Gipfelplateaus der Sulzfluh wird von einem fast vegetationsfreien, eindrucksvollen Karrenfeld gebildet. Dieses befindet sich in einer Höhe zwischen etwa 2400 und 2700 m und ist damit das höchste Karrenfeld Vorarlbergs. Hier lassen sich interessante Übergangsformen von Frostsprengung und Karstkorrosion beobachten (Scherbenkarst). Im Untergrund sind bedeutende Höhlensysteme vorhanden (STAHEL 1926, WILDBERGER 1996).

In östlicher Richtung taucht der Sulzfluhkalk unter die kristallinen Gesteine der Silvrettadecke ab. Zwischen beiden Einheiten ist die geringmächtige ostalpine Arosa-Zone eingeschuppt. Südlich der Schijenflue ist die Überschiebung der ostalpinen Decken (Arosa-Zone und Silvretta-Kristallin) über die penninische Sulzfluhdecke als scharfer Kontrast zwischen hellem Kalk und dunklem Kristallin zu erkennen (Abb. 4).

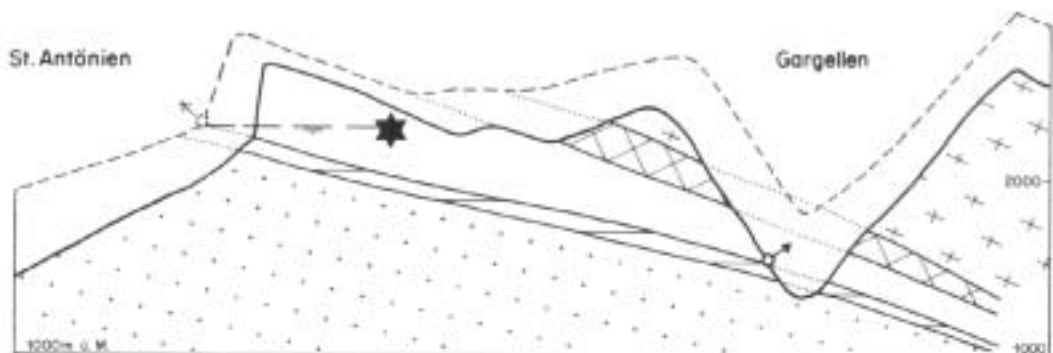


Abb. 4: Gipfel südlich der Schijenflue von Westen. Die Grenze zwischen dem hellen Sulzfluhkalk und den darüber geschobenen dunklen kristallinen Gesteinen ist deutlich zu erkennen.

Abb. 5: Hydrogeologische Karte des Karstsystems Sulzfluh-Gargellenfenster (WILDBERGER 1996)



Wenige Kilometer südöstlich ist der Sulzfluhkalk im Tal von Gargellen in Form eines tektonischen Fensters wieder aufgeschlossen (Abb. 5, 6). Im Gargellenfenster befinden sich einige Karstquellen, z. B. die Fidelisquelle. Die hydraulischen Verbindungen zwischen der Sulzfluh und diesen Quellen wurden teils durch einige mäßig gut dokumentierte Markierungsversuche belegt, teils werden sie nur vermutet (Loacker 1988, Wildberger 1996). Hier bietet sich die einmalige Gelegenheit die Hydrogeologie eines Karstaquifers unter kristalliner Überdeckung zu studieren.



LEGENDE:



3.3 Helvetikum: Hochfifen-Gottesacker

Hochfifen und Gottesacker liegen im Grenzgebiet zwischen Bregenzerwald, Kleinwalsertal und Allgäuer Alpen (Abb. 1). Der Hochfifen ist mit 2230 m der höchste Gipfel. Der nördlich angrenzende, etwa 10 km² große Gottesacker ist die größte und eindrucksvollste Karstlandschaft der Region (Abb. 7) und ähnelt in seinem Erscheinungsbild den berühmten Karstlandschaften der nördlichen Schweizer Alpen (z. B. Schratzenfluh, Siebenhengste-Hohgant). Er besteht wie diese aus Schratzenkalk und zeigt eine Vielfalt ober- und unterirdischer Karstformen: Karrenfelder, Karstgassen, Schächte und Höhlen. Das Hölloch im Mahdtal ist die größte Höhle des Gottesackergebiets (in Deutschland gelegen); das Schneckenloch im westlichen Gottesacker ist sogar die größte Höhle Vorarlbergs. Das gesamte hydrologisch abgegrenzte Karstsystem einschließlich der umgebenden Täler ist etwa 70 km² groß.

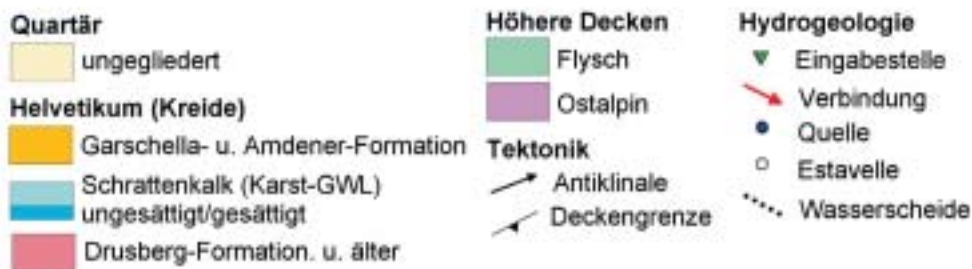
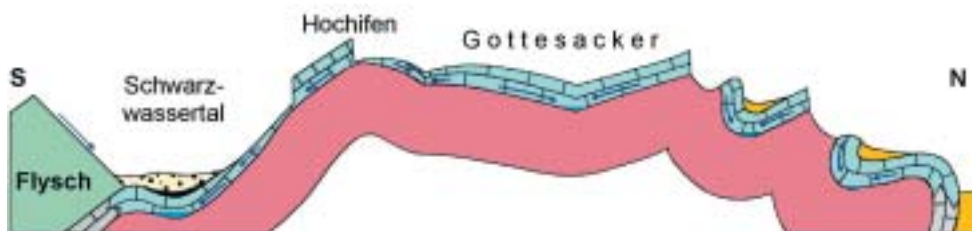
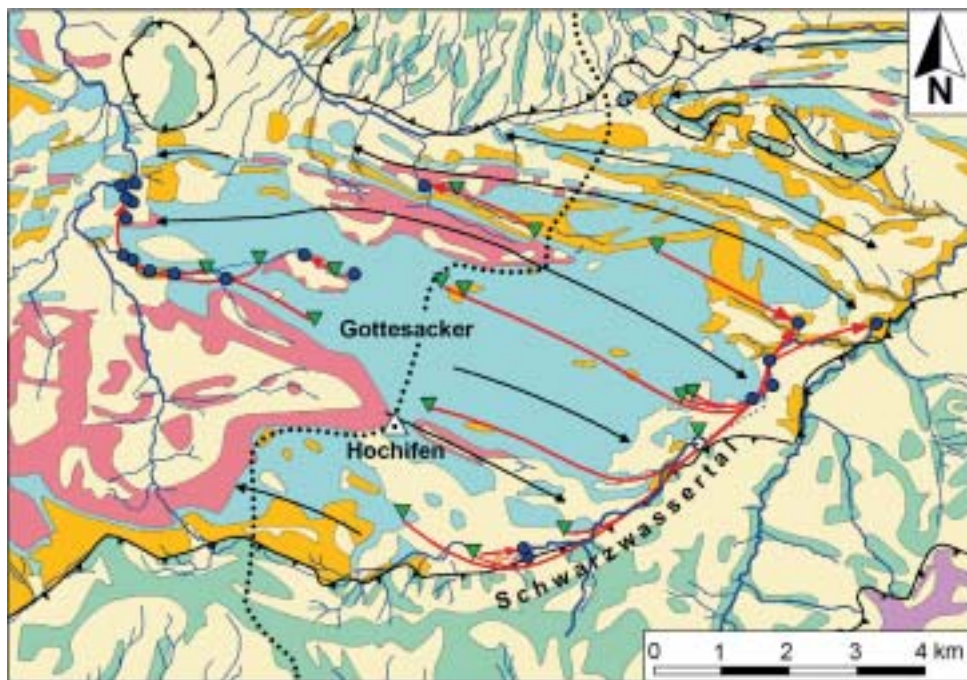
Abb. 6: Schematisches hydrogeologisches Profil durch die Sulzfluh und das Gargellenfenster (WILDBERGER 1996)



Abb. 7: Blick vom Gipfel des Hochifien nach Norden auf die ausgedehnten Karrenfelder des Gottesackers.

Die Karstformen und Höhlen des Gottesackers werden seit über 100 Jahren erforscht (u.a. ECKERT 1902, WAGNER 1950, CRAMER 1959, SPÖCKER 1961, SCHMIDT-THOMÉ 1960, KRIEG 1988, ROSENDAHL 2000). Die hydrogeologischen Verhältnisse wurden aber erst in jüngerer Zeit geklärt (GOLDSCHIEDER 1998, GOLDSCHIEDER ET AL. 1999, GOLDSCHIEDER & HÖTZL 2000, GOLDSCHIEDER ET AL. 2001, SINREICH, et al. 2002). Die aktuellste und umfassendste Darstellung findet sich bei GOLDSCHIEDER (2002).

Geologisch gehören Hochifien und Gottesacker zur Säntis-Decke, also zum Helvetikum (Abb. 8). Es sind Gesteine der Kreidezeit (Valendis bis Campan) abgeschlossen. Die ältesten sind Valendismergel, Oolithkalk und Kieselkalk, die jedoch hydrogeologisch kaum eine Rolle spielen. Darüber folgen die Drusbergschichten, eine bis zu 250 m mächtige Folge von Mergeln und einzelnen Kalkbänken. Sie übernehmen die Funktion des Liegendstauers unter dem Schratenkalk, einem 75–125 m mächtigen, chemisch reinen und stark verkarstungsfähigen Kalkstein. Er bildet nahezu die gesamte Oberfläche des Gottesackers, den Hochifien, die Schluchten im Schwarzwassertal und die Breitachklamm. Darüber folgen die Garschella-Formation und der Seewerkalk, die im Gebiet meist nur einige Meter mächtig sind und stellenweise fehlen. Die Amdener Mergel sind bis zu 250 m mächtig. Diese drei Formationen wirken als Hangendstauer über dem Karstaquifer. In den Tälern sind quartäre Ablagerungen anzutreffen, v.a. einzeitliche Moränen, sowie eine hydrogeologisch interessante Bergsturzmasse im oberen Schwarzwassertal (SINREICH et al. 2002).



Die Gesteinsschichten sind gefaltet. Im Gebiet befinden sich sechs Antiklinalen (Faltensättel) und sechs Synklinalen (Faltenmulden). Die Antiklinalen bilden oft langgestreckte Bergrücken, die Synklinalen formen Täler, wie das Mahdtal, Kürental und Löwental (Abb. 8). Die Faltenachsen kulminieren auf dem Gottesacker. Von dort tauchen sie in südöstlicher Richtung zum Schwarzwassertal und unter den Flysch ab. Nach Westen senken sich die Faltenachsen zum Subersachtal hin ab. Außerdem sind die Gesteine intensiv zerbrochen und entlang von Störungen gegeneinander verschoben, was die Verkarstung begünstigt.

Abb. 8: Geologie und Hydrogeologie des Karstsystems Hochifener-Gottesacker. Die durch Markierungsversuche belegten unterirdischen Verbindungen zeichnen den Faltenbau nach (GOLDSCHIEDER 2002).



Abb. 9: Markierungsversuch im Hochifen-Gottesacker Gebiet. Durch die Eingabe des Fluoreszenztracers Uranin in den Eingang der Schwarzwasserhöhle, der zum Versuchszeitpunkt als Schwinde fungierte, konnten u.a. die unterirdischen Verbindungen zur Aubach- und Sägebachquelle belegt werden. Bei Hochwasser wird der Höhleneingang zur Quelle. Es handelt sich also um eine Estavelle.

Die Hochlagen des Gebietes sind oberflächlich abflusslos. Im Subersachtal und v.a. im Schwarzwassertal befinden sich dagegen große Karstquellen, wie die Aubachquelle, die bei Hochwasser bis zu 6000 L/s schüttet und in Trockenzeiten rasch versiegt, sowie die Sägebachquelle am Ausgang des Mahdtales. Eine hydrogeologisch besonders interessante Erscheinung ist die Schwarzwasserhöhle. Bei Niedrigwasser versinkt der Schwarzwasserbach mit bis zu 500 L/s vollständig im Höhleneingang; bei Hochwasser steigt der Wasserspiegel in der Höhle, bis diese schließlich überläuft, zur Quelle wird und bis zu 4000 L/s schüttet. Es handelt sich also um eine Estavelle, vermutlich die größte im Alpenraum (Abb. 9).

Durch 16 Markierungsversuche konnten die hydrogeologischen Verhältnisse weitgehend geklärt werden (Abb. 8, Abb. 9). Alle auf der Ostseite des Gebietes eingegebenen Markierungsstoffe (Tracer) erreichten das Schwarzwassertal, (fast) alle auf der Westseite eingegebenen Tracer das Subersachtal. Die topographische Kulminationslinie fällt daher (weitgehend) mit der unterirdischen Wasserscheide zusammen, was für Karstgebiete nicht selbstverständlich ist. Die Synklinalen bilden unterirdische Abflussbahnen, die Antiklinalen wirken als lokale Wasserscheiden. Im Schwarzwassertal ist auf voller Länge ein zusammenhängender Karstaquifer vorhanden, der alle vom Gottesacker und den Hochtälern unterirdisch zufließenden Wässer sammelt und an die Estavelle und wenige Karstquellen im unteren Abschnitt des Tales weiterleitet. Tiefster Auslass auf der Ostseite des Gebietes ist eine Grundquelle auf 980 m, welche unsichtbar direkt in die Breitach

austritt. Auf der Westseite des Gebiets durchtrennt das Subersachtal den Karstaquifer in den Antiklinalen. Daher bilden dort die einzelnen Synklinalen hydraulisch weitgehend isolierte, in sich sehr komplexe und hydrologisch variable Systeme. Beispielsweise konnte belegt werden, dass Wasser, welches im westlichen Gottesacker (Löwental) versickert, bis zu sechs mal hintereinander an Quellen austritt, um anschließend wieder im Untergrund zu versinken. Die tiefsten Austrittspunkte sind hier die Goldbachquelle 3 und eine kleine Quelle an der Subersach auf 960 m. Die höchsten gemessenen unterirdischen Fließgeschwindigkeiten betragen über 300 m/h.

3.4 Faltenmolasse: Hochgrat-Lecknertal

Die Faltenmolasse zieht sich als schmaler, über 500 km langer Streifen entlang des Alpennordrandes von Genf bis zum Chiemsee. Im südwestlichen Bayern und in Vorarlberg erreicht diese Zone eine Breite von über 20 km und in der markanten Hochgratkette Gipfelhöhen bis zu 1834 m. Der untersuchte Bereich liegt im zentralen Teil des Hochgrat-Adeleg-Fächers (siehe *Kapitel 2*). Die Schichtenfolge besteht dort zu 90 % aus Konglomeratbänken (Nagelfluh), die durch Mergel und untergeordnet auch Sandsteine getrennt werden. Der durchschnittliche Karbonatgehalt der Schichtenfolge beträgt 74 %, stellenweise erreichen die Konglomeratbänke aber Werte von nahezu 100 % (SCHÜTZ 1991).

Die Faltenmolasse wird aus weitgespannten Faltenzügen aufgebaut, die sich in der Morphologie der Landschaft widerspiegeln: Antiklinalen (Faltensättel) bilden meist Bergketten, Synklinalen (Faltenmulden) bilden Täler. Diese Faltenzüge sind durch bedeutende Überschiebungen und Querstörungen voneinander getrennt. Das Untersuchungsgebiet gehört zur südlichsten tektonischen Einheit, der Steinebergmulde, und wird gegliedert in zwei Synklinalen und eine Antiklinale. Sie sind auch morphologisch eindeutig im Gelände zu erkennen: Die Obergelchenwang-Synklinale liegt im Bereich des Obergelchenwang-Tobels, die Scheidwang-Synklinale im Lecknertal, die dazwischenliegende Leiterberg-Antiklinale formt den gleichnamigen Höhenrücken (*Abb. 10*).

Der hohe Karbonatgehalt der Konglomeratbänke ermöglicht eine große Vielfalt und Anzahl an Karsterscheinungen. Da die Karstformen generell eine relativ geringe Größe besitzen, in ihrer Ausprägung nicht so markant sind und bisher von ihrer Existenz in Konglomeraten wenig bekannt war, wurden sie früher meist übersehen oder falsch gedeutet; Dolinen wurden beispielsweise als eiszeitliche Toteislöcher interpretiert.

Im Rahmen der Arbeiten beider Autoren in Zusammenarbeit mit H. Scholz (TU München) konnten in der Faltenmolasse zahlreiche Dolinen, Karrenfelder und Karstquellen entdeckt und untersucht werden; als Besonderheit auch zwei kleine Estavellen, die im alpinen Raum eher selten sind (GÖPPER et al. 2002, 2003). Abgesehen von einigen nur wenige Meter großen unterirdischen Hohlformen wurden im Gebiet bisher noch keine Höhlen gefunden.

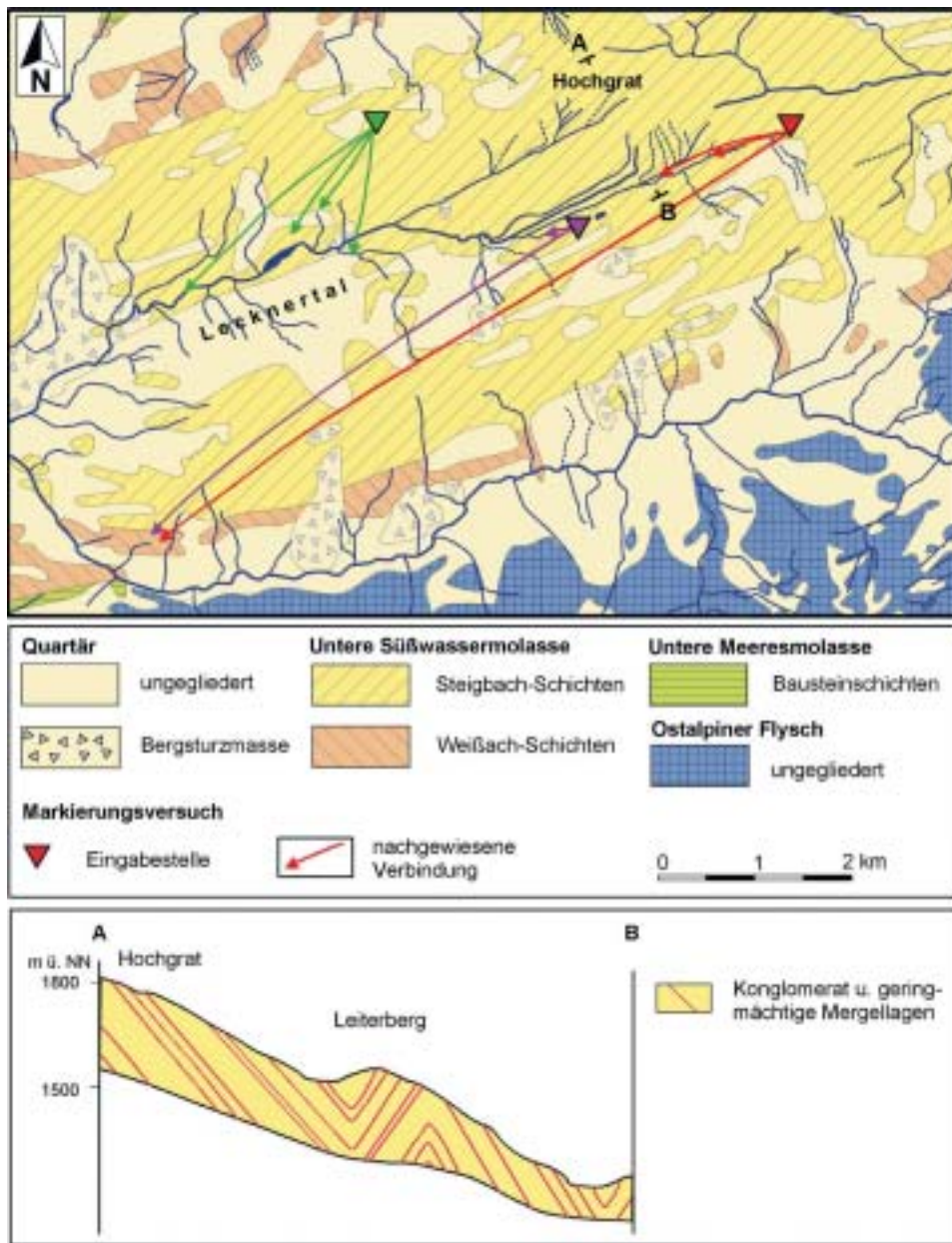


Abb. 10: Geologische Karte und Profil des Gebietes Hochgrat Lecknertal, Gewässernetz und durch Markierungsversuche nachgewiesene unterirdische Verbindungen.

Die Dolinen besitzen mit einem Durchmesser von bis zu 10 m eine recht geringe Größe, sind aber sehr zahlreich entlang der Konglomeratrippen zu finden. An ihrem Grund befindet sich oft ein Schluckloch, ein sogenannter Ponor. Durch ihn sind die Dolinen direkt mit dem Untergrund verbunden und drainieren so das angrenzende Areal. Gewöhnlich sind die Ponore armdick, die Tiefe eines Ponors im Kammereich der Hochgratketten konnte auf über 14 m bestimmt werden. Um die Lage, Anzahl und Ausbildung der Dolinen herauszuarbeiten, wurden zwei Detailkartierungen durchgeführt. Dabei wurden die Dolinen nach Durchmesser,



Tiefe und Form eingeteilt und auf einer Karte im Maßstab 1:2000 dargestellt (GÖPPER 2002). In einem etwa 40 ha großen Gebiet bei der Lache-Alp konnten über 100 Dolinen gezählt werden, darunter zahlreiche Ponordolinen und zwei Estavellen (Abb. 11). Auf dem Südhang des Leiterbergs fand eine zweite Kartierung statt. Auf einer Fläche von 20 ha konnten hier über 30 Dolinen gezählt werden, die ebenfalls entlang der Konglomeratbänke aufgereiht sind.

Karren bilden sich bevorzugt auf den Schichtflächen der Konglomeratbänke. Die Rundkarren zeigen, dass sowohl Gerölle als auch Matrix gleichermaßen chemisch gelöst werden. Die nicht löslichen Komponenten, wie z. B. Radiolarite, wittern vollständig aus dem Gesteinspaket heraus, und sammeln sich am Böschungsfuß.

In der Faltenmolasse treten kleine Hohlformen auf, die alle Eigenschaften von Poljen aufweisen: Sie sind rundum geschlossene Hohlformen, die ausschließlich unterirdisch entwässern und einen ebenen Talboden besitzen. Aufgrund ihrer geringen Größe von nur etwa 1 ha werden die Formen in der Faltenmolasse als Kleinpoljen bezeichnet. Sie bilden sich entweder in Synklinaldepressionen oder in eiszeitlichen Karen (Abb. 12).

Aus den Konglomeraten treten zahlreiche Quellen aus. Bei den meisten Quellen beträgt die Schüttung nicht mehr als 10 L/s und schwankt infolge von Niederschlagsereignissen stark. Wenige Quellen erreichen bei hohen Niederschlägen eine Schüttung von über 300 L/s. Oft liegen die Karstquellen am talwärtigen Ende ausstreichender Konglomeratbänke. Dort sind teils auch höhlenartig erweiterte Quellaustritte zu finden.

Hydrochemisch zeigen die Quellwässer einen erhöhten Anteil an Magnesium, was auf die Dolomitgerölle in den Konglomeraten zurückzuführen ist. Die hygienische Wasserqualität ist bei vielen Quellen nicht ausreichend (Analysen des Umweltinstituts des Landes Vorarlberg).

Abb. 11: Tiefblick auf die Lache-Alp. Die Pfeile deuten die Lage einiger auffälliger Dolinen an. Im Rahmen einer Detailkartierung (GÖPPER 2002) wurden hier über 100 Dolinen entdeckt. Die Dolinenreihen folgen meist den Schichtgrenzen zwischen verkarsteten Konglomeratbänken und wasserstauenden Mergeln.



Abb. 12: Kleinpolje bei der Hohenfluh-Alp, die sich aus einem eiszeitlichen Kar entwickelt hat. Die Kleinpolje hat einen ebenen Boden, ist oberflächlich abflusslos und entwässert über Schlucklöcher in die verkarstete Konglomeratrinne in der Bildmitte.

Bei einem Markierungsversuch mit drei Eingabestellen in aktiven Ponoren konnten überraschend hohe Fließgeschwindigkeiten von über 250 m/h und lange Fließwege von über 7,5 km festgestellt werden (GÖPPERT et al. 2002). Der Hauptabstrom der Tracer folgte dem Streichen der Molasse-Strukturen. Die Mergellagen zwischen den Konglomeratbänken wurden entlang von Störungen überwunden. Untergeordnet konnte auch ein Fließen entlang von Querstörungen quer zum Streichen der Molasse-Strukturen, also in Fallrichtung der Konglomeratbänke beobachtet werden.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Weder die längsten Höhlen noch die größten Karstquellen befinden sich in Vorarlberg, aber kaum irgendwo sonst im Alpenraum ist eine derartige Vielfalt an Karsterscheinungen auf so engem Raum zu beobachten. In Vorarlberg gibt es Karstsysteme in allen vier tektonisch-stratigraphischen Baueinheiten der Alpen: Ostalpin, Penninikum, Helvetikum und Molasse. Bei den verkarsteten Gesteinen handelt es sich um verschiedene Kalksteine, Dolomit, Gips und Konglomerat. Diese stammen aus vier Erdzeitaltern: Trias, Jura, Kreide und Tertiär. Die verkarsteten Gesteine stehen in allen Höhenlagen an, von den tiefsten Tälern bis hin zu den höchsten Gipfeln. Nur wenige Karstgebiete Vorarlbergs sind bisher hydrogeologisch

detailliert untersucht worden (Hochifen-Gottesacker, Winterstaude). Aus einigen Gebieten liegen nur alte und teils zweifelhafte Untersuchungen vor (Formarinsee). Viele Karstgebiete Vorarlbergs sind noch hydrogeologisches Neuland (weite Bereiche des Ostalpins).

In Vorarlberg gibt es alle Übergänge zwischen voll entwickelten Karstaquiferen mit einem unterirdischen Netzwerk aus Höhlen, Röhren und Spalten (Schrattenkalk, Sulzfluhkalk) auf der einen Seite und überwiegend geklüfteten Carbonatgesteinen (Hauptdolomit) auf der anderen Seite. In den Konglomeraten (Nagelfluh) der Faltenmolasse lassen sich sogar Übergänge zwischen Poren-, Kluft- und Karstaquiferen beobachten: Feste, carbonatreiche Konglomerate sind als Karstaquifere anzusprechen; feste aber weniger carbonatreiche Konglomerate bilden Kluftaquifere; gering verfestigte bzw. durch Verwitterung entfestigte Konglomerate wirken als Porenaquifere. Die Bergketten und Täler der Faltenmolasse zwischen Hittisau (Vorarlberg) und Gunzesried (Bayern) sind wohl eines der bedeutendsten Konglomerat-Karstgebiete der Alpen. In Vorarlberg befinden sich auch die längste Gipshöhle (die Trübbachhöhle) und die größte bekannte Estavelle der Alpen (die Schwarzwasserhöhle). Das System Sulzfluh-Gargellenfenster bietet die nahezu einmalige Gelegenheit, einen Karstaquifer unterhalb kristalliner Überdeckung zu beobachten.

Viele Gemeinden in Vorarlberg beziehen einen Teil ihres Trinkwassers aus Karstquellen. Diese Quellen sind oft bakteriologisch belastet. Ursache der Belastung ist meist die Alpwirtschaft, teils auch touristische Einrichtungen. Um die Quellen besser zu schützen, muss zunächst ihr Einzugsgebiet bekannt sein. Gerade in Karstgebieten sind die Quelleinzugsgebiete aber oft groß und kompliziert aufgebaut. Zur Abgrenzung sind daher hydrogeologische Untersuchungen unverzichtbar, insbesondere Markierungsversuche. Die Erforschung der Vorarlberger Karstsysteme ist daher nicht nur wissenschaftlich und landeskundlich interessant, sondern auch von großem praktischen Nutzen.

5. Dank

Wir möchten uns bei allen bedanken, die uns bei unseren Arbeiten in Vorarlberg unterstützt haben, insbesondere bei der Vorarlberger Naturschau, dem Umweltinstitut, dem Landeswasserbauamt, dem Landschaftsschutz Kleinwalsertal, der Ifen-Lift KG und den Gemeinden Hittisau und Bezau. Besonderer Dank gilt Prof. Dr. H. Hötzl (AGK) für die Betreuung unserer Promotion, Prof. Dr. H. Scholz (TU München) für die gute Zusammenarbeit im Bereich der Faltenmolasse, sowie allen Diplomanden, die durch ihre Arbeiten zur Erforschung der Karstgebiete Vorarlbergs beigetragen haben.

6. Literatur

BAUER, F. (1989): Die unterirdischen Abflussverhältnisse im Dachsteingebiet und ihre Bedeutung für den Karstwasserschutz; Bericht UBA-89-28, Wien.

- COST 65 (1995): Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, Final report (COST action 65). – European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Report EUR 16547 EN: 446 p.; Brüssel, Luxemburg.
- COWARD, M. & DIETRICH, D. (1989): Alpine tectonics – an overview. – In: Coward, M.P., DIETRICH, D. & PARK, R.G. (eds.), *Alpine Tectonics*, Geological Society Special Publication, 45, 1–29; Oxford (Blackwell).
- CRAMER, K. (1959): Die Geologie des Mahdtales und der Karst des Gottesackergebietes. – Master thesis TH Munich: 80p.; Munich (unpubl.).
- DREW, D. & HÖTZL, H. [eds.] (1999): *Karst Hydrogeology and Human Activities. Impacts, Consequences and Implications.* – International Contributions to hydrogeology (IAH), 20: 322 p.; Rotterdam/Brookfield (Balkema).
- ECKERT, M. (1902): Das Gottesackerplateau, ein Karrenfeld im Allgäu. Studien zur Lösung des Karrenproblems. – Wissenschaftl. Ergänzungshefte zur Zeitschr. d. D. u. Ö. Alpenvereins, 1(3); Innsbruck.
- FORD, D. & WILLIAMS, D. W. (1989): *Karst Geomorphology and Hydrology.* – 601 p.; Boston (Unwin Hyman).
- GOLDSCHIEDER, N. (1998): Hydrogeologische Untersuchungen im alpinen Karstgebiet Gottesacker und Schwarzwassertal (Allgäu/Vorarlberg). – *Vorarlberger Naturschau*, 4: 247–294; Dornbirn.
- GOLDSCHIEDER, N., ORTH, J.-P., VATER, K. & HÖTZL, H. (1999): Die Schwarzwasserhöhle – eine hydrogeologisch bedeutsame Estavelle im alpinen Karstgebiet Hochiften-Gottesacker (Kleinwalsertal, Vorarlberg, Österreich). – *Laichinger Höhlenfreund*, 34(2): 69–96; Laichingen.
- GOLDSCHIEDER, N. & HÖTZL, H. (2000): Tektonik und Karstentwässerung. – In: Hochiften und Gottesacker – eine Karstlandschaft zwischen Bregenzer Wald und Allgäuer Alpen. *Karst und Höhle 2000/2001*: 51–82, 34 Abb., 2 Tab.; München.
- GOLDSCHIEDER, N., HÖTZL, H. & KÄSS, W. (2001): Comparative Tracer Test in the Alpine Karst System Hochiften-Gottesacker, German-Austrian Alps – *Beitr. z. Hydrogeologie* 52: 145–158, 7 fig., 3 tab.; Graz.
- GOLDSCHIEDER, N. (2002): Hydrogeology and vulnerability of karst systems – examples from the Northern Alps and Swabian Alb. – PhD thesis (Dissertation), *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe*, 68: 236 p.; Karlsruhe. www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/2002/bio-geo/3/3.pdf
- GOLDSCHIEDER, N., NEUKUM, C. & WERZ, H. (2001): Hydrogeologie und Trinkwasserschutz im alpinen Karstsystem der Winterstaude (Marktgemeinde Bezau, Bregenzerwald). – *Vorarlberger Naturschau*, 11: 9–58: 32 S., 29 Abb.; Dornbirn.
- GÖPPERT, N. (2002): Karsterscheinungen und Hydrogeologie karbonatischer Konglomerate der Subalpinen Molasse im Gebiet Hochgrat/Lecknertal (Bayern/Vorarlberg). – unveröffentlichte Diplomarbeit am Lehrst. f. angewandte Geologie der Univ. Karlsruhe: 96S.; Karlsruhe.
- GÖPPERT, N., GOLDSCHIEDER, N. & SCHOLZ, H. (2002): Karsterscheinungen und Hydrogeologie karbonatischer Konglomerate der Faltenmolasse im Gebiet Hochgrat und Lecknertal (Bayern/Vorarlberg). – *Beitr. z. Hydrogeologie*, 53: 21–44; Graz.

- GÖPPERT, N., GOLDSCHIEDER, N. & SCHOLZ, H. (2003): Karsterscheinungen in Konglomeraten im Gebiet Hochgrat-Lecknertal bei Hittisau (Bregenzerwald). – Vorarlberger Naturschau, 12: 9–29; Dornbirn
- HERLICZKA, H., LORBEER, G., HUMER, G., BOROVIČENKY, MANDL, G. W. & TRIMBORN, W. (1995): Pilot Project «Karst Water Dachstein». – In: COST Action 65: Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas (Final Report). Report EUR 16547 EN: 21–34.; Brüssel.
- KRIEG, W. (ed.) (1988): Karst und Höhlen in Vorarlberg. – Karst- und Höhlenkundlicher Ausschuß des Vorarlberger Landesmuseumsvereins: 84 p.; Dornbirn.
- LOACKER, H. (1988): Karst und Wasserkraftbau in Vorarlberg. In: Krieg, W. [ed.]: Karst und Höhlen in Vorarlberg: 71–84; Dornbirn (Vorarlberger Landesmuseumsverein).
- OBERHAUSER, R. (1998): Geologisch-Tektonische Übersichtskarte Vorarlberg, mit Erläuterungen. Karte 1:200.000, Erläuterungen 42 S.; Geologische Bundesanstalt Wien.
- ROSENDAHL, W. (2000): Die Formen des Oberflächenkarstes (Exokarst) im Gebiet Hochiften-Gottesackerplateau (Kleinwalsertal). – In: Hochiften und Gottesacker – eine Karstlandschaft zwischen Bregenzer Wald und Allgäuer Alpen. Karst und Höhle 2000/2001: 83–88; Munich.
- SCHMIDT-THOMÉ, P. (1960): Zur Geologie und Morphologie des Ifengebirgsstockes (Allgäu). Erläuterungen zur topographisch-morphologischen Kartenprobe VI 3: Alpiner Karst und Bergsturz. – Erdkunde, 14(3): 181–195; Bonn.
- SCHOLZ, H. (2000): Die tertiären Grobschüttungen am Südrande des Molassebeckens im Allgäu (Südwestbayern) – eine Synopsis.- N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 218 (1/2), 61–84; Stuttgart.
- SCHOLZ, H., & Strohmenger, M. (1999): Dolinenartige Sackungsstrukturen in den Molassebergen des südwestbayerischen Alpenvorlandes.- Jber. Mitt. oberrh. geol. Ver., N.F. 81, 275–283, 3 Abb.; Stuttgart (Schweizerbart).
- SCHÜTZ, J. (1991): Mineralspektren von Molasse und Flysch im Gunzesrieder Achtal. – Materialien zur Geographie, 18: 109 S.; Mannheim (Geographisches Institut der Universität Mannheim).
- SINREICH, S., GOLDSCHIEDER, N. & HÖTZL, H. (2002): Hydrogeologie einer alpinen Bergsturzmasse (Schwarzwassertal, Vorarlberg). – Beitr. z. Hydrogeologie, 53: 5–20; Graz.
- SPÖCKER, R. G. (1961): Das Hölloch als geographisches Element. – In: SCHMIDT-THOMÉ, P. [Red.]: Das Hölloch bei Riezlern im Kleinen Walsertal (Allgäu-Vorarlberg) – eine karstkundliche Monographie. – Wiss. Alpenvereinsh., 18: 33–53; Innsbruck (Wagner).
- STAHEL, A.H. (1926): Geologische Untersuchungen im nordöstlichen Rätikon. – Diss. Univ. Zürich, 82 p.
- WAGNER, G. (1950): Rund um Hochiften und Gottesackergebiet. Eine Einführung in die Erd- und Landschaftsgeschichte des Gebietes zwischen Iller und Bregenzer Ach: 116 p.; Öhringen (Rau).
- WILDBERGER, A. (1996): Zur Geologie und Hydrogeologie des Karstes der Sulzfluhhöhlen (St. Antönien, Graubünden). – Stalactite, 46/2: 112–118

- ZÖTL, J. (1957): Bericht über hydrogeologische Untersuchungen im Raume Formarinsee. Wien (unveröff. Bericht d. ÖBB).
- ZÖTL, J. (1958): Ergebnisse des zweiten Sporentriftversuches im Raume Formarinsee. Graz (unveröff. Bericht d. ÖBB).
- ZÖTL, J. (1961): Die Hydrographie des nordalpinen Karstes. – Steir. Beitr. Hydrogeol., 1960/61: 163p.; Graz.
- ZWAHLEN, F. [ed.] (2004): Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report (COST action 620). European Commission: 297 p.; Brussels, Luxemburg. <http://capella.unine.ch/chyn/pdf/FinalReportCOST620.pdf>

Anschrift der Autoren

Dr. Nico Goldscheider
Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel (CHYN)
Université de Neuchâtel
11 Rue Emile-Argand
CH-2000 Neuchâtel

Nadine Göppert
Lehrstuhl für Angewandte Geologie (AGK)
Universität Karlsruhe
Kaiserstr. 12
D-76128 Karlsruhe