

Karsterscheinungen und Hydrogeologie karbonatischer Konglomerate der Faltenmolasse im Gebiet Hochgrat und Lecknertal (Bayern/Vorarlberg)

*Karst Development in Carbonate Conglomerates of the Folded Molasse Zone
Exemplified by a Test Site in the Austro-German Alps*

N. GÖPPERT¹⁾, N. GOLDSCHIEDER²⁾ & H. SCHOLZ³⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	22
2. Untersuchungsgebiet	23
2.1. Geographischer Überblick	23
2.2. Geologischer Überblick	24
3. Karsterscheinungen.....	27
3.1. Karren	27
3.2. Dolinen und Höhlen	28
3.3. Kleinpoljen.....	29
4. Karsthydrographie und Hydrochemie	30
4.1. Karstquellen	30
4.2. Schwinden und Estavellen.....	32
4.3. Hydrochemie	33
5. Markierungsversuch.....	33
5.1. Fragestellung und Versuchsanordnung	33
5.2. Ergebnisse	35
6. Schlussfolgerungen und Ausblick	37
6.1. Die Faltenmolasse als Karstlandschaft	37
6.2. Typen der Karstentwässerung	38
6.3. Bedeutung der Ergebnisse	38
Zusammenfassung.....	39

¹⁾ Dipl.-Geol. Nadine GÖPPERT, Institut für Angewandte Geologie (AGK), Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-76128 Karlsruhe. E-mail: nadine.goepfert@agk.uka.de

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

³⁾ Dr. Herbert SCHOLZ, Privatdozent, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie, TU München, Arcisstraße 21, D-80290 München. E-mail: herbert.scholz@geo.tum.de

Literatur.....	40
Summary.....	42
Dank.....	43

1. Einleitung

Die Faltenmolasse (Subalpine Molasse) zieht sich als schmaler, über 500 km langer Streifen entlang des Alpennordrands von Genf bis etwa zum Chiemsee; östlich davon ist sie nur lückenhaft vorhanden (K. LEMCKE, 1988). Im südwestlichen Bayern (Allgäu) und in Vorarlberg erreicht diese Zone eine Breite von über 20 km und in der markanten Hochgratkette Gipfelhöhen bis zu 1834 m (Fig. 1). Bisher galt die Allgäuer und Vorarlberger Faltenmolasse, außerhalb der von Quartär erfüllten Haupttäler, als ein Gebiet ohne bedeutende, nutzbare Grundwasservorkommen, in dem sich daher auch der Grundwasserschutz relativ unproblematisch darstellt. Gebiete mit einem Untergrund aus Molassemergeln wurden früher sogar als geeignete Standorte für Mülldeponien angesehen. Tatsächlich stellt die Sicherung der Trinkwasserqualität für einige Gemeinden und private Fassungen in diesem Gebiet jedoch ein Problem dar. Insbesondere die bakteriologische Beschaffenheit der Quellwässer ist oft nicht befriedigend.

Seit 1989 wurden weite Teile der Allgäuer und Vorarlberger Faltenmolasse im Rahmen mehrerer Diplom- und Doktorarbeiten unter Leitung von H. SCHOLZ (TU München) neu kartiert (S. WEISS, 1991, D. APPEL, 1992, T. BEIHL, 1991, M. BOSCH, 1999, S. BRAMMER, 1994, C. BÜHRING, 1993, S. DEGELMANN, 1991, S. GEBAUER, 1998, A. HAUTMANN, 1998, R. IRMLER, 2001, A. KANZOCK, 1995, J. NEUBERT, 1999, B. PAST, 2001, H. PRÖMM, 1991, T. ROGOZINSKI, 1998, M. SCHEIDHAMMER, 1994, M. STROHMENGER, 1991, 1998, Th. WASSERRAB, 1999, A. WIMMER, 1998). Dabei standen zunächst stratigraphische Fragen und das Quartär im Mittelpunkt (die Ergebnisse sind in H. SCHOLZ, 1993, 1999 und 2000 zusammengefasst).

Die dominierenden Gesteine innerhalb der Faltenmolasse sind Konglomerate, die in den alemannischen Gebieten auch als „Nagelfluh“ bezeichnet werden. Die oft sehr grobkörnigen und mächtigen Konglomeratbänke bestehen in bestimmten Bereichen der Faltenmolasse überwiegend aus Dolomit- und Kalkgeröllen (K. LEMCKE, 1988, H. SCHOLZ, 1999). Der Karbonatanteil der Kies- und Sandfraktion kann 90 % übersteigen. Es handelt sich also rein mineralogisch betrachtet eigentlich um Karbonatgesteine, die bekanntlich zur Verkarstung neigen. In den Erläuterungen zu den amtlichen geologischen Karten (vgl. H. JERZ, 1974, Ch. KUHNERT et al., 1974, Ch. KUHNERT & W.-M. ROHR, 1975, F. MÜLLER, 1952, K. SCHWERD, 1983, K. SCHWERD et al., 1983, Th. VOLLMAYR, 1958, Th. VOLLMAYR & J. H. ZIEGLER, 1976) finden sich jedoch keinerlei dezidierte Hinweise auf Karsterscheinungen.

Tatsächlich wurden in den Untersuchungsgebieten der TU München aber hunderte von Dolinen entdeckt, in denen oft sogar Bäche versinken – ein deutlicher Hinweis auf einen verkarsteten Untergrund (H. SCHOLZ & M. STROHMENGER, 1999). Auch in anderen Gebieten der Faltenmolasse wurden vereinzelt Karstphänomene beschrieben (W. BALDERER, 1989, A. POCHON & F. ZWAHLEN, 2002). Eine umfassende Untersuchung und Bewertung von Karsterscheinungen in den Konglomeraten der Faltenmolasse steht jedoch noch aus.

Im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte

und Ingenieur-Geologie der TU München und dem Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (AGK) wurden daher in einem ausgewählten Untersuchungsgebiet in der Faltenmolasse (Fig. 2) die oberirdischen und unterirdischen Karsterscheinungen und ihre hydrogeologische Funktion systematisch untersucht. Zunächst wurden die oberirdischen Karstformen, Gewässernetz, Quellen und Schwinden detailliert kartiert und ihr Zusammenhang mit den stratigraphischen und tektonischen Gegebenheiten analysiert. Durch hydrochemische Methoden und einen kombinierten Markierungsversuch wurde anschließend überprüft, ob den oberirdisch erkennbaren Formen auch ein unterirdisches Karstnetzwerk gegenübersteht, welches die charakteristischen hydrogeologischen Eigenschaften eines Karstgrundwasserleiters zeigt.

2. Untersuchungsgebiet

2.1. Geographischer Überblick

Als Untersuchungsgebiet wurde ein Abschnitt der Hochgratkette und das südlich angrenzende Lecknertal im Grenzgebiet von Allgäuer Alpen (Bayern) und Bregenzerwald (Vorarlberg) ausgewählt (Fig. 1). Die hydrogeologischen Untersuchungen wurden auf einem Gebiet von insgesamt 20 km² durchgeführt. Davon wurden 9 km² im Maßstab 1 : 10 000 geologisch neu kartiert, wobei einzelne Konglomerat- und Mergelbänke anhand von digitalen Orthofotos (1 : 5000) des Bayerischen Landesvermessungsamts unterschieden werden konnten. In zwei 20 bzw. 40 ha großen Teilgebieten wurden geomorphologische Detailkartierungen im Maßstab 1 : 2000 durchgeführt und jede einzelne Doline exakt vermessen (N. GÖPPERT, 2002). Die verwendeten geogra-

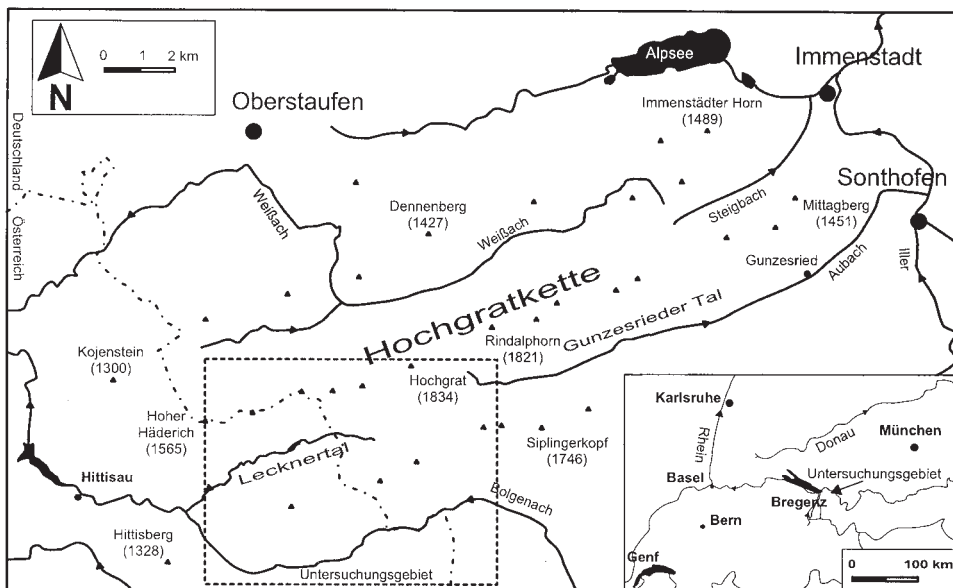


Fig. 1: Untersuchungsgebiet mit den wichtigsten Lokalitäten.
Investigation area including the most important sites of the region.

phischen Bezeichnungen sind der TK50, L 8526 Immenstadt i. Allgäu (BAYERISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT, 1994) und TK50, L 8524 Lindau (Bodensee) (BAYERISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT, 1982) sowie der TK25, Blatt 8525/26 Balderschwang (BAYERISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT, 1991) entnommen.

Der Hochgrat ist mit 1834 m der höchste Punkt des Untersuchungsgebietes (Fig. 1) und zugleich der Hauptgipfel einer 20 km langen, etwa W–E verlaufenden Gebirgskette, die hier als Hochgratkette bezeichnet wird. Die Europäische Hauptwasserscheide zwischen Rhein und Donau verläuft über den Hochgrat und quert die südlich angrenzende Talfurche über den Sattel bei der Scheidwang-Alp. Das östlich der Wasserscheide liegende Gunzesrieder Tal gehört zum Einzugsgebiet der Donau, während das westlich davon liegende Lecknertal zum Rheinischen System hin entwässert. Das Untersuchungsgebiet liegt größtenteils westlich der Wasserscheide. Der Lecknerbach ist der wichtigste lokale Vorfluter. Er mündet bei Hittisau auf 783 m Höhe in die Bolognach, welche letztlich dem Rhein zufließt.

In der Klimastation Hittisau auf 790 m Höhe beträgt die Jahressumme des Niederschlags im 30-jährigen Mittel 2020 mm, die durchschnittliche Lufttemperatur 7,1 °C. In den Hochlagen des Untersuchungsgebietes ist mit höheren Niederschlägen, einem höheren Anteil von Schnee und niedrigeren Temperaturen zu rechnen. Die Waldgrenze liegt auf etwa 1600 m und wird wie fast überall in den Nordalpen von der Fichte gebildet; die Baumgrenze wird nicht erreicht.

2.2. Geologischer Überblick

Das Molassebecken ist das nördliche Vorlandbecken der Alpen. Es bildete sich im Oligozän und Miozän und nahm den Abtragungsschutt des sich hebenden Gebirges auf. Spätestens seit dem Obermiozän heben sich die Alpen mitsamt ihrem Vorland, so dass die Sedimentation allmählich aufhörte. Der Südrand des Beckens wurde während der Zeit der Molassesedimentation von den nach N vorrückenden alpinen Decken überfahren. Teile der Schichtfolge wurden vom Untergrund abgeschert und sind daher durch Falten und Überschiebungen charakterisiert. Diese Zone wird als Subalpine Molasse oder Faltenmolasse bezeichnet, im Unterschied zur kaum deformierten Vorlandmolasse.

Die Bildung der Molasse umfasst zwei Transgressionsphasen mit anschließender Regression. In den zentralen Teilen des Molassebeckens wird daher zwischen Unterer Meeres- und Süßwassermolasse, sowie Oberer Meeres- und Süßwassermolasse unterschieden. Die Sedimente wurden von Flüssen aus den Alpen ins Vorlandbecken transportiert und dort in großen Schuttfächern abgelagert. Die Untere Süßwassermolasse (USM) im Allgäu und in Vorarlberg wird durch drei große Schuttfächer geprägt: der Pfänderfächer im W (Bodensee-Schüttung), der Nesselburgfächer im Osten (Nesselburg-Auerberg-Schüttung) und der Hochgrat-Adelegg-Fächer im Zentrum (Hochgrat-Adelegg-Schüttung), der mit ursprünglich mehr als 1000 km² paläographischer Ausdehnung zu den größten Radialschüttungen der Molasse gehört (K. LEMCKE, 1988, H. SCHOLZ, 2000).

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich des Hochgrat-Adelegg-Fächers und wird überwiegend von Gesteinen der USM aufgebaut. Die USM wird in der Faltenmolasse konventionell in Weißach-, Steigbach- und Kojen-Schichten gegliedert (P. F. MUHEIM, 1934, K. SCHWERD et al., 1983). Diese Stratigraphie setzt isochrone Schichtgrenzen voraus und verwendet eine Kombination bio- und lithostratigraphischer Kriterien. Die Sedimentation in der Molasse verlief aber diachron, daher stimmen bio- und lithostratigraphische Grenzen nicht überein. Aufgrund der Fossilarmut ist eine Kartierung

mit Hilfe biostratigraphischer Kriterien außerdem kaum möglich. Die Verwendung der konventionellen Stratigraphie führte daher in der Vergangenheit zu widersprüchlichen Ergebnissen (H. SCHOLZ, 1999). Auf Grundlage der Arbeiten der TU München (Zitate siehe Kap. 1) wird deshalb von H. SCHOLZ eine neue Stratigraphie entwickelt, welche sich in Übereinstimmung mit internationalen Konventionen (A. SALVADOR, 1994) ausschließlich auf lithostratigraphische Kriterien stützt. Da die neue Stratigraphie noch nicht publiziert ist, werden die Gesteine im Untersuchungsgebiet im Folgenden rein lithologisch beschrieben und die konventionellen stratigraphischen Bezeichnungen erwähnt.

Nahezu das gesamte Untersuchungsgebiet wird von einer etwa 700 m mächtigen Schichtfolge aufgebaut, die von früheren Bearbeitern (Th. VOLLMAYR, 1958) den oberoligozänen Steigbach-Schichten zugerechnet wurde (Fig. 2). Diese Schichtfolge repräsentiert den proximalen Teil des Hochgrat-Adelegg-Fächers und besteht zu 90 % aus Konglomeratbänken. Daneben treten auch Mergel und untergeordnet Sandsteine auf. Bei den Komponenten der Konglomerate handelt es sich überwiegend um Kalk- und Dolomitgerölle, die am Hochgrat Korndurchmesser bis zu 70 cm erreichen und aufgrund des korngestützten Gefüges charakteristische Lösungsellen zeigen. Auch das Bindemittel ist karbonatisch. Die einzelnen Bänke können Mächtigkeiten von 60 m erreichen. Die trennenden Mergellagen sind maximal 10 m mächtig und stark verwitterungsanfällig. Sandsteine treten nur als gering mächtige, lateral rasch auskeilende Bänke auf. Der durchschnittliche Karbonatgehalt der Schichtfolge beträgt 74 % (J. SCHÜTZ, 1991), einzelne Konglomeratbänke bestehen aber fast ausschließlich aus karbonatischem Material. Lithologisch läßt sich die Schichtfolge in unterschiedliche Faziesbereiche gliedern: Der obere Teil des Nordhangs und der Gipfelgrat der Nagelfluhkette besteht fast nur aus extrem grobkörnigen Konglomeraten mit nur sehr geringmächtigen feinklastischen Zwischenlagen. Die Südhänge bestehen dagegen aus einer Wechselfolge aus mächtigen, immer noch sehr grobkörnigen Konglomeraten und meist deutlich weniger mächtigen Mergellagen. Am Südfuß der südlich ans Lecknertal angrenzenden Bergkette stehen Gesteine an, die konventionell den Weißbach-Schichten zugeordnet werden. Auch diese Formation besteht je nach lokaler fazieller Ausbildung aus einer Wechsellagerung von Konglomeraten, Mergeln und Sandsteinen in unterschiedlichen Anteilen.

Die Subalpine Molasse wird aus weitgespannten Faltenzügen aufgebaut, die sowohl durch bedeutende Überschiebungen, als auch durch Querstörungen (Blattverschiebungen) voneinander getrennt werden. Das Untersuchungsgebiet gehört zur südlichsten tektonischen Einheit der Faltenmolasse, der sogenannten Steinebergmulde (Th. VOLLMAYR, 1958). In weiten Teilen der Nagelfluhkette fallen die Schichten steil nach S ein. Die südlich an den Hochgrat angrenzenden Bereiche zeigen einen ausgeprägten Faltenbau. Dort gibt es zwei Synklinalen und eine Antiklinale, die nicht nur tektonisch nachweisbar, sondern auch morphologisch erkennbar sind: Die Obergellenwang-Synklinale (I in Fig. 2) und die Scheidwang-Synklinale (III) bilden Täler, während die dazwischen liegende Leiterberg-Antiklinale (II) den gleichnamigen Bergrücken formt. Die Faltenachsen kulminieren im Bereich der Hauptwasserscheide und tauchen von dort beidseitig ab.

Teile des Gebietes sind von Quartär bedeckt. In den Tälern finden sich Lokalmoränen, Stillwassersedimente und Eisrandablagerungen, die Hänge sind lokal von geringmächtigem Hangschutt bedeckt. Die Wechsellagerung von Konglomeraten und Mergeln und die geneigten Schichten begünstigen die Entstehung bedeutender Massenbewegungen im Gebiet der Faltenmolasse. Als Untersuchungsgebiet wurde jedoch

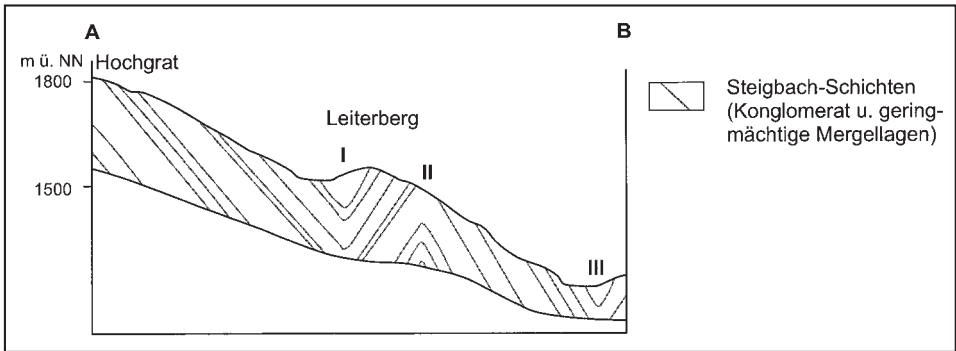
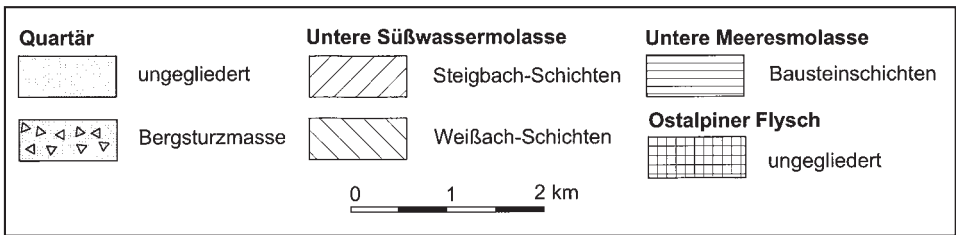
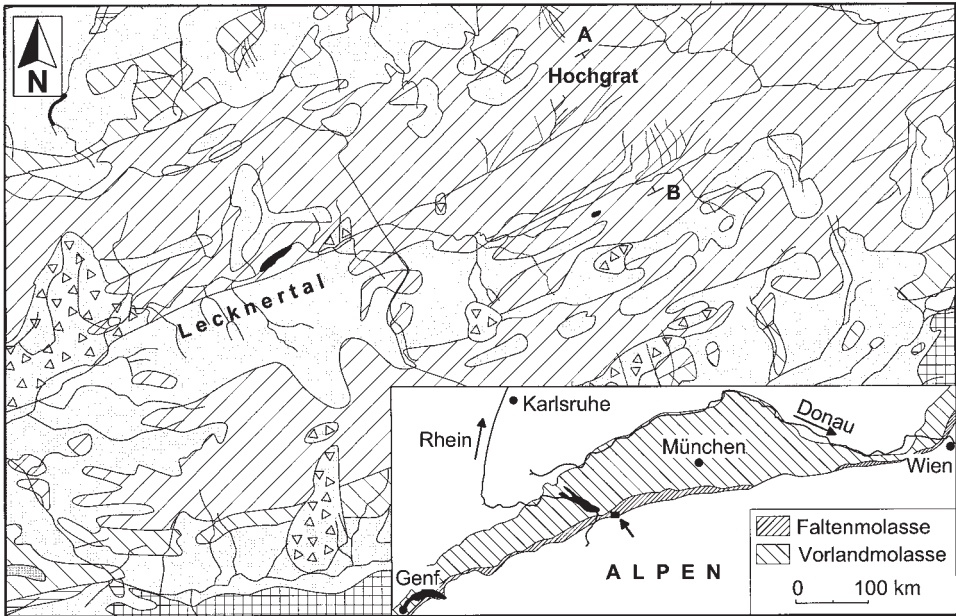


Fig. 2: Lage des Untersuchungsgebietes innerhalb der Faltenmolasse (nach K. LEMCKE, 1988), stark vereinfachte geologische Karte des Gebiets (Grundlage: W. ZACHER, 1985) und geologisches Profil (nach N. GÖPPERT, 2002); die römischen Ziffern bezeichnen die Falten.
 Location of the test site within the zone of the Folded Molasse (after K. LEMCKE, 1988), simplified geological map of the area (basis: W. ZACHER, 1985) and geological section (N. GÖPPERT, 2002); folds are named with roman numbers.

bewusst ein Bereich ausgewählt, der nicht großflächig von tiefgreifenden Massenbewegungen geprägt ist.

3. Karsterscheinungen

3.1. Karren

Karren sind im Gebiet auf Sandstein und vor allem auf Konglomerat zu beobach-



Fig. 3: Rimmenkarren in karbonatischen Konglomeraten zeigen die Lösung von Matrix und Komponenten.

Karren in carbonate conglomerates which show corrosion of both components and matrix.

ten und treten in allen Höhenlagen auf, auch auf Felssturzböcken und Findlingen. Bei Karren auf Konglomerat sind das Bindemittel und die Komponenten gleichermaßen korrodiert (Fig. 3). Auf den nicht von Vegetation bedeckten Oberflächen von Konglomeratbänken haben sich lokal Karrenfelder entwickelt. Die dominierenden Karrenformen sind Rinnenkarren und Kluftkarren. In den Hochlagen des Gebietes, die im Pleistozän nicht unter Gletscherbedeckung lagen, sind die Konglomerate oft geringer zementiert und daher verwitterungsanfälliger. Hier sind auf Schichtköpfen oft vertikale Furchen und Röhren entwickelt, die nicht auf Verkarstung, sondern auf ein Zusammenspiel von mechanischer Verwitterung und Erosion zurückgehen.

3.2. Dolinen und Höhlen

Dolinen sind die auffälligsten und häufigsten Karstformen im Untersuchungsgebiet. Sie sind meist trichterförmig, haben einen Durchmesser von bis zu 20 m und sind maximal 10 m tief. An ihrem Grund befindet sich häufig ein offener Schacht (maximal 14 m tief), der in vielen Fällen als aktiver Ponor wirkt. Die Verteilung der Dolinen wird durch den kleinräumigen Wechsel von verkarstungsfähigen Konglomeratbänken, wasserstauenden Mergeln und quartären Sedimenten geprägt. Viele Dolinen liegen im Grenzbereich zwischen Mergel und Konglomerat und erhalten einen oberirdischen Zufluss aus den angrenzenden, oft muldenförmig ausgeräumten Mergelbereichen (Fig. 4). Eine Doline am Westhang des Rindalphorns vermittelt den Einstieg zu einer wenige Meter großen Höhle. Eine weitere Kleinhöhle befindet sich im Obergelchenwangtobel (siehe N. GÖPPERT, 2002). Nur sehr vereinzelte Dolinen im Gebiet stehen in erkennbarem

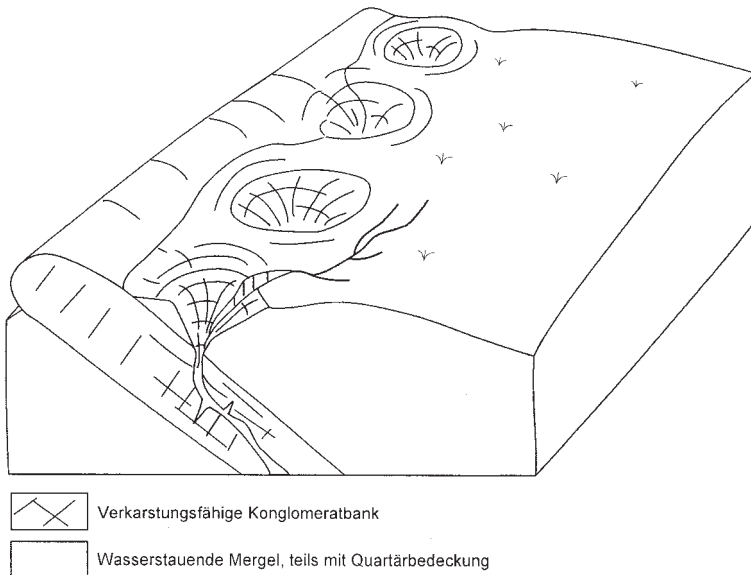


Fig. 4: Dolinenreihe am Kontakt von verkarsteten Konglomeraten und wasserstauenden Mergeln, welche teilweise von quartären Sedimenten (Moräne, Stillwassersedimente) bedeckt sind (siehe N. GÖPPERT, 2002).

Aligned dolines near the contact of karstified conglomerates and impervious marls which are partially covered by Quaternary sediments (N. GÖPPERT, 2002).

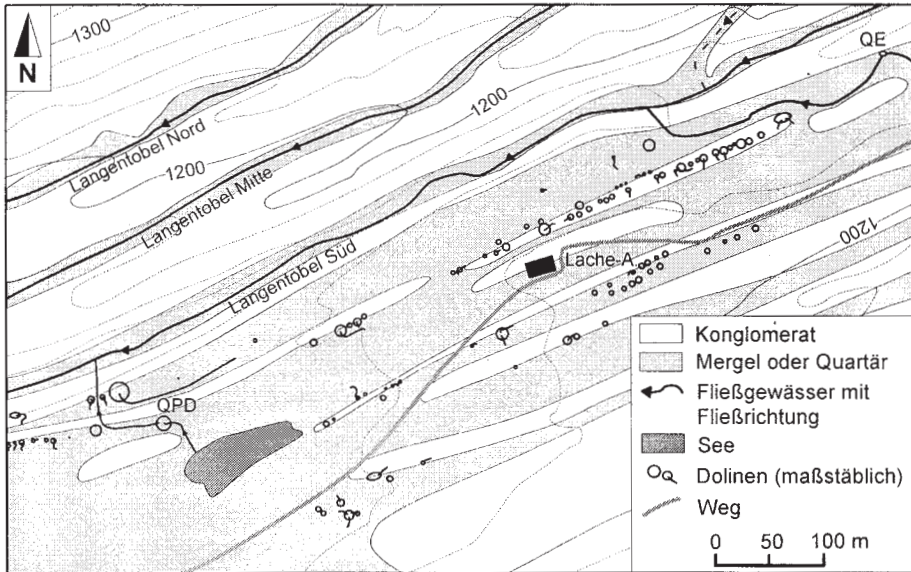


Fig. 5: Karstmorphologische Detailkartierung im Gebiet oberes Lecknertal/Lache-Alp. Alle Dolinen wurden mit Laser-Distanz-Messgerät nach Lage und Größe vermessen. Die Dolinenreihen zeichnen den kleinräumigen Wechsel von Konglomerat und Mergel nach. QE und QPD sind Estavelles (N. GÖPPERT, 2002).

Detailed map of the karst geomorphology in the upper Lecknertal around the Lache-Alp. The location and diameter of all dolines was measured with a laser distance measuring instrument. The aligned dolines reflect the interstratification of conglomerate and marl. QE and QPD are estavelles (N. GÖPPERT, 2002).

Zusammenhang mit Störungen.

In zwei Teilgebieten wurde eine Detailkartierung im Maßstab 1 : 2000 durchgeführt, wobei jede Doline mit einem Laser-Distanz-Messgerät nach Lage und Größe vermessen wurde (N. GÖPPERT, 2002). Im Gebiet Leiterberg wurden auf 20 ha 32 Dolinen, im Gebiet oberes Lecknertal/Lache-Alp auf einer Fläche von 40 ha 102 Dolinen kartiert. Die Dolinen sind in Reihen angeordnet und folgen den Konglomeratrippen (Fig. 5). Zahlreiche Dolinen in diesem Gebiet wirken temporär als Schwinde, mindestens eine sogar als Estavelle (siehe Kap. 4). Neben diesen durch Verkarstung entstandenen Dolinen wurden im Gebiet der Faltenmolasse auch Hohlformen beschrieben, die auf rein mechanische Subrosionsvorgänge in Lockersedimenten zurückgeführt werden können (H. SCHOLZ & M. STROHMENGER, 1999).

3.3. Kleinpoljen

Im Gebiet befinden sich zwei größere Hohlformen, die alle Charakteristika eines Polje zeigen, allerdings nur wenige Hektar groß sind. Diese Formen werden daher als „Kleinpolje“ bezeichnet. Die beiden Kleinpoljen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer geologischen Struktur und Genese (Fig. 6).

Das Kleinpolje bei der Hohenfluh-Alp ist eine oberflächlich abflusslose, allseitig geschlossene Hohlform mit kreisrundem, ebenem und von Sediment bedecktem Talboden, der einen Durchmesser von etwa 100 m aufweist. Die Entwässerung erfolgt aus-

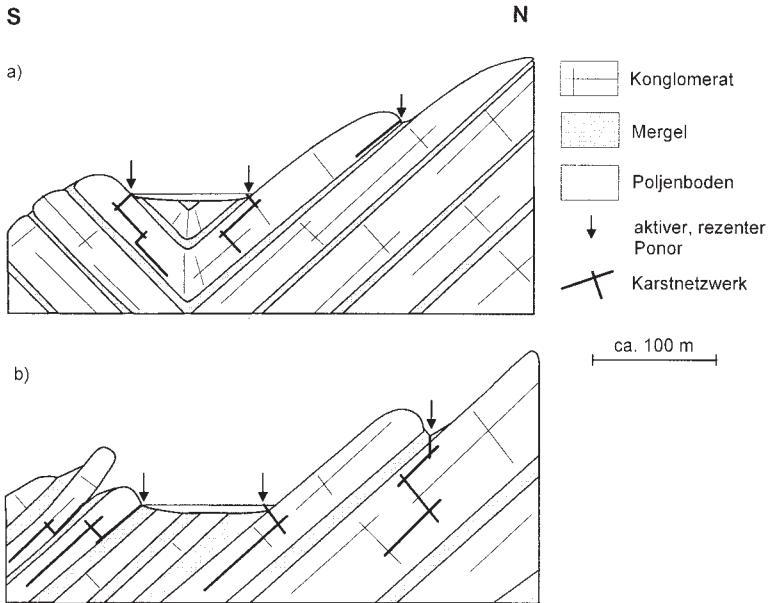


Fig. 6: Schematische Darstellung der beiden Kleinpoljen im Untersuchungsgebiet: a) das Kleinpolje bei der Untergelchenwang-Alp ist in einer Synklinale angelegt; b) das Kleinpolje bei der Hohenfluh-Alp hat sich in einer einheitlich südfallenden Schichtfolge aus einem Kar entwickelt. Schematic presentation of the two small poljes in the test site: a) the small polje near the Untergelchenwang-Alp follows a syncline, b) the small polje near the Hohenfluh-Alp formed in a kar within a generally southward dipping stratification.

schließlich unterirdisch über drei Ponore. Die Hänge dieses Kleinpolje sind aus der einheitlich südfallenden Wechselfolge von Konglomeraten und Mergeln aufgebaut. Talwärts ist die Hohlform durch eine Konglomeratrinne abgeriegelt, die wenige Meter über dem Niveau des heutigen Poljebodens einen Durchgang aufweist, der als ehemaliger oberirdischer Auslass gedeutet wird. In der Konglomeratrinne ist auch eine höhlenförmig erweiterte Schichtfuge zu erkennen, bei der es sich um einen Paläoponor handelt. Dieses Kleinpolje hat sich vermutlich aus einem Kar entwickelt, wobei die Höhendifferenz zwischen dem Paläoponor und den rezenten Ponoren die postglaziale Tieferlegung des Poljebodens dokumentiert.

Das Kleinpolje bei der Untergelchenwang-Alp ist dagegen in der Achsendepression der Obergelchenwang-Synklinale (I in Fig. 2) angelegt, also tektonisch bedingt. Im Grenzbereich zwischen dem ebenen, schmal-ellipsenförmigen Talboden und der südlich begrenzenden, durchgehend aufgeschlossenen Konglomeratrinne liegen einige Ponordolinen. Die Hohlform enthält in Abhängigkeit von den jeweiligen hydrologischen Verhältnissen oberirdische Zuflüsse von einigen Quellen und Bächen, die jedoch innerhalb des Kleinpolje versinken. Oberirdischer Abfluss findet nur vorübergehend nach ergiebigen Niederschlägen statt.

4. Karsthydrographie und Hydrochemie

4.1. Karstquellen

Alle Quellen im Gebiet wurden kartiert, hydrogeologisch klassifiziert und die Schüttung mit der Salzverdünnungsmethode (Gerät: QTRACE) gemessen oder geschätzt (N. GÖPPERT, 2002). Neben zahlreichen kleinen, flachgründigen Hangschuttquellen und einigen größeren Quellen, die Bergsturzmaterial entwässern, gibt es im Gebiet 22 Quellen, die als Karstquellen klassifiziert wurden, weil sie entweder direkt aus anstehendem Konglomerat entspringen, oder eindeutig mit einer Konglomeratrippe in Zusammenhang stehen.

Die größte Karstquelle im Gebiet liegt 850 m talaufwärts der Lache-Alp auf 1220 m Höhe (QLa in Fig. 7). Sie besteht aus zwei perennierenden und sechs intermittierenden Austrittsstellen, von denen einige höhlenförmig erweitert sind. Die Gesamtschüttung liegt zwischen 10 und 138 l/s (gemessen), bei extremem Hochwasser wurden 400 l/s geschätzt.

Eine weitere Karstquelle (QO2) entspringt auf 1320 m Höhe im Bachbett des Obergelchenwangtobels, also in der Tiefenlinie der gleichnamigen Synklinale (I in Fig. 2). Die Quelle tritt aus einer 1,7 m hohen und 3 m langen Höhle aus und schüttet bei Nie-

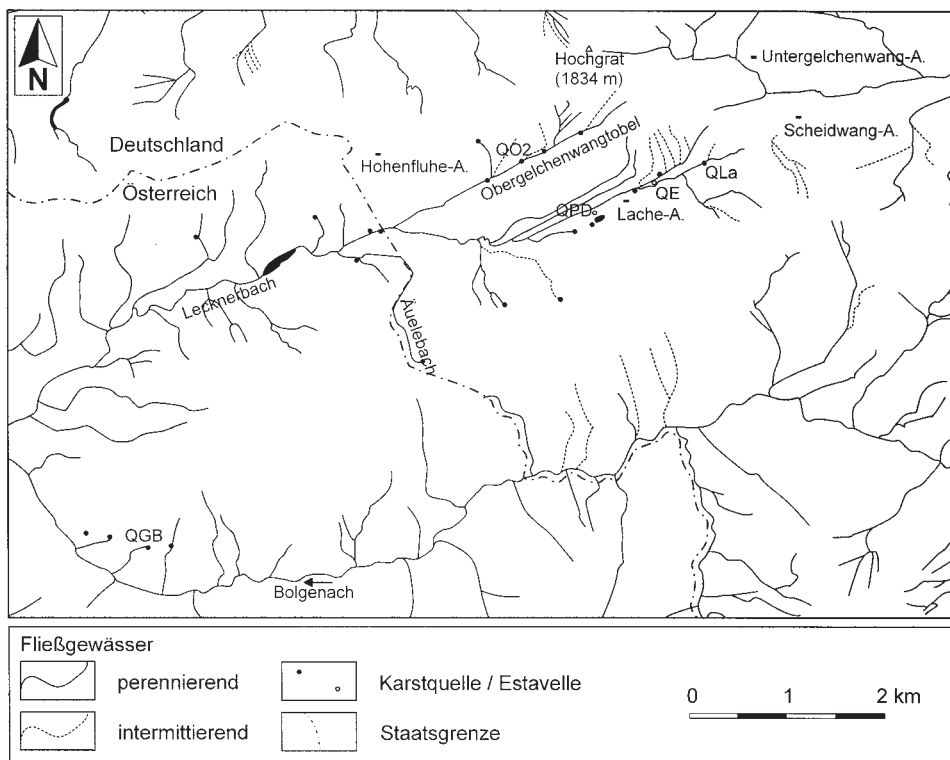


Fig. 7: Gewässernetz und Lage der untersuchten Quellen, die als Karstquellen eingestuft wurden.
Surface waters and location of all investigated springs that were classified as (conglomerate) karst springs.

drigwasser 15 l/s; bei Hochwasser ist sie nicht zugänglich.

Auch eine der beiden Trinkwasserquellen der Gemeinde Hittisau ist als Karstquelle anzusprechen (QGB). Sie tritt aus Gesteinen der Weißach-Schichten im Grenzbereich von Konglomerat zu Mergel aus und schüttet im Mittel etwa 10 l/s. Die Quelle liegt im Tal der Bolgenach auf 940 m Höhe, also außerhalb des Einzugsgebietes des Lecknertals. Eine unterirdische Verbindung zwischen dem oberen Lecknertal und der Quelle wurde jedoch für möglich gehalten, da die Quelle bezogen auf das Streichen genau in der Verlängerung der Konglomeratbänke des oberen Lecknertals liegt und dort weite Bereiche unterirdisch entwässern. Daher wurde diese Quelle in die Untersuchungen mit einbezogen.

4.2. Schwinden und Estavellen

Zahlreiche Dolinen im Untersuchungsgebiet fungieren ständig oder zeitweise als Schwinden. Dabei liegt das Einzugsgebiet der versinkenden Fließgewässer meist in den angrenzenden Mergelbereichen, die oft auch von Quartär bedeckt sind.

Der sich aus der Quellgruppe QL_a bildende Bach versinkt bei Niedrigwasser etwa 400 m stromabwärts vollständig im Bachbett, und zwar genau dort, wo eine Konglomeratrippe unter Quartärbedeckung abtaucht. Bei mittlerer Schüttung fließt das Gewässer über diese Schwinde hinweg und versinkt nach etwa 160 m in einer Karstspalte am orographisch rechten Ufer, direkt am Fuß einer zum Bach hin einfallenden Konglomeratbank (Fig. 8 a). Als maximale Versinkungsrate wurden 20 l/s gemessen. Nach ergiebigen Regenfällen wird diese Karstspalte zur Quelle (Fig. 8 b) und schüttet bis zu 100 l/s. Es handelt sich also um eine Estavelle (QE).

Eine zweite Estavelle (QPD in Fig. 5) liegt bei der Schwarzlache, einem kleinen Moorsee westlich der Lache-Alp. Bei Niedrigwasser ist der See oberirdisch abflusslos. Bei mittlerem Wasserstand entwässert der See in nordwestliche Richtung über einen kleinen Bach, der nach etwa 50 m in einer trichterförmigen Doline versinkt. Bei Hochwasser

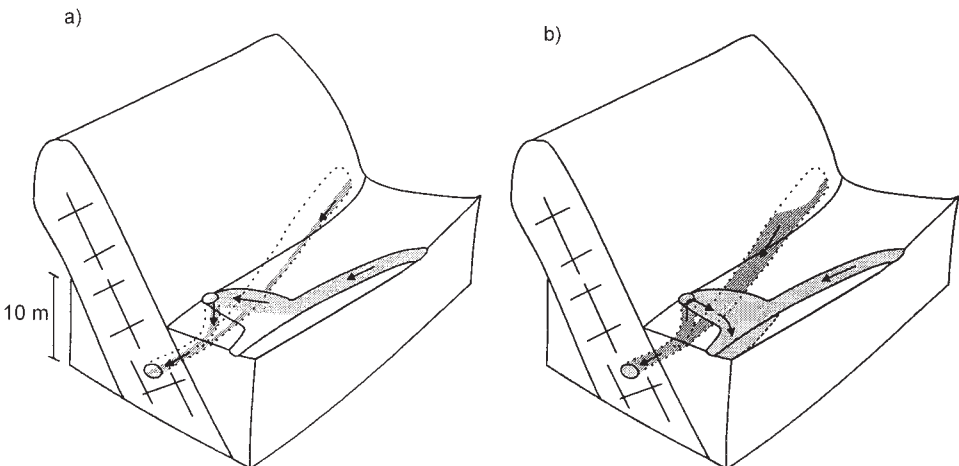


Fig. 8: Die Estavelle QE östlich der Lache-Alp ist bei Niedrigwasser eine Schwinde (a) und bei Hochwasser eine Quelle (b) (N. GÖPPERT, 2002).

The estavelle QE east of the Lache-Alp acts as a swallow hole during low water (a) and becomes a spring during high water event (b) (N. GÖPPERT, 2002).

läuft die Doline über. Durch Abflussmessung konnte gezeigt werden, dass in diesem Zustand bei einem Zufluss von 8 l/s und einem Abfluss von 14 l/s bis zu 6 l/s mehr aus der Doline ab-, als oberirdisch zufließen. Auch eine signifikante Erniedrigung der Temperatur und Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit zwischen Zufluss und Abfluss der Estavelle wurde nachgewiesen (N. GÖPPERT, 2002). Während Wasser aus der Schwarzlache am Zufluss zur Ponordoline eine Temperatur von 9,7 °C und eine Leitfähigkeit von 101 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aufweist, erreicht der Abfluss eine Wassertemperatur von 7,8 °C und eine Leitfähigkeit von 145 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Somit konnte belegt werden, dass es sich auch bei dieser Doline um eine Estavelle handelt.

4.3. Hydrochemie

An den Quellen im Gebiet wurde im Untersuchungszeitraum (Juli bis Oktober 2001) regelmäßig die Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und Schüttung gemessen. Vom 5. bis 7. Oktober 2001 wurden insgesamt an 25 Stellen Quellen und Fließgewässer bei mittleren Abflussverhältnissen hydrochemisch beprobt (N. GÖPPERT, 2002). In allen Quellwässern ist Hydrogenkarbonat (195–253 mg/l) das dominierende Anion und Calcium (43–66 mg/l) das dominierende Kation, während Magnesium (8,2–11,2 mg/l) in geringeren Konzentrationen auftritt. Dies spiegelt die Zusammensetzung der Konglomerate aus Kalk- und Dolomitgeröllen wider. Die Gehalte an Chlorid, Sulfat, Phosphat, Nitrat, Silizium, Kalium und Natrium liegen in allen Quellwässern unter 5 mg/l, meist sogar deutlich darunter. Alle Quellwässer genügen hinsichtlich ihrer hydrochemischen Beschaffenheit den Bestimmungen der Trinkwasserverordnung. Der Calcit-sättigungsindex SI_{Calcit} der untersuchten Wässer liegt zwischen $-1,32$ und $+0,35$. Kalkabscheidend wirken insgesamt vier Wässer – aus quartären Bergsturzmassen und Fließgewässer. Alle Quellen, die direkt aus Konglomerat entspringen, sind durch kalkaggressives Wasser ($SI_{\text{Calcit}} < 0$) charakterisiert. Dies belegt eine wenig intensive Wasser-Gesteins-Wechselwirkung, deutet also auf ein gut entwickeltes Karstnetzwerk und relativ kurze Verweilzeiten (W. DREYBRODT, 2000). Infolge dieser kurzen Verweilzeiten sind die Quellen bakteriologisch belastet, weshalb die zur Trinkwasserversorgung genutzten Quellwässer durch Einsatz von UV-Anlagen entkeimt werden müssen.

5. Markierungsversuch

5.1. Fragestellung und Versuchsanordnung

Um zu überprüfen, ob den oberirdisch erkennbaren Karstformen ein ebenso entwickeltes unterirdisches Entwässerungssystem gegenübersteht, wurde im September 2001 im Gebiet ein kombinierter Markierungsversuch durchgeführt (Fig. 9). Dabei sollten die generelle Richtung der unterirdischen Entwässerung, die horizontalen Fließdistanzen und die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers ermittelt werden.

Die Tracerinjektionen wurden am 8. September 2001 von N. GOLDSCHIEDER vorgenommen. Der September war mit 375 mm der niederschlagsreichste Monat und der Eingabetag mit 70 mm der niederschlagsreichste Tag des hydrologischen Jahres. Der Versuch repräsentiert also extreme Hochwasserverhältnisse. Als Markierungsstoffe kamen die drei Fluoreszenztracer Uranin, Eosin und Sulforhodamin B zum Einsatz. Zur Eingabe wurden drei Stellen ausgewählt (Fig. 9):

- E1: Die Ponordoline bei der Scheidwang-Alp liegt 250 m westlich der Europäischen Hauptwasserscheide, genau dort, wo eine Konglomeratrinne unter Stillwasserseimente abtaucht. An ihrem Grund befinden sich zwei Ponore, in denen zeitweise Oberflächenwasser versinkt. Am Tage des Markierungsversuchs betrug die Versinkungsrate ca. 5 l/s. Durch die Eingabe von 2 kg Eosin sollten die unterirdischen Fließwege im Talbereich auf voller Länge markiert werden.
- E2: Die Ponordoline 700 m südwestlich der Lache-Alp wurde ausgewählt, da hier fast ständig Wasser im Untergrund versinkt und sich nur selten aufstaut, so dass eine aktive Anbindung an das unterirdische Entwässerungssystem gewährleistet ist. Hier wurden 0,5 kg Sulforhodamin B eingegeben, um so die Fließwege im Talbereich auf kürzerer Distanz zu markieren. Zur Zeit der Injektion versanken etwa 5 l/s in der Doline.
- E3: Oberhalb des Kleinpolje bei der Hohenfluh-Alp befindet sich eine Ponordoline mit 14 m tiefem Schacht (in Fig. 6 b schematisch dargestellt). Hier wurde 1 kg Uranin eingegeben; die Versinkungsrate betrug etwa 5 l/s.

Die Markierungsstoffe wurden als trockenes Pulver in 20 l Plastikkanistern zu den Eingabestellen transportiert und dort mit Wasser versetzt, gelöst und direkt in die versinkenden Wasserläufe eingespeist. Eine Vor- oder Nachspülung war daher nicht not-

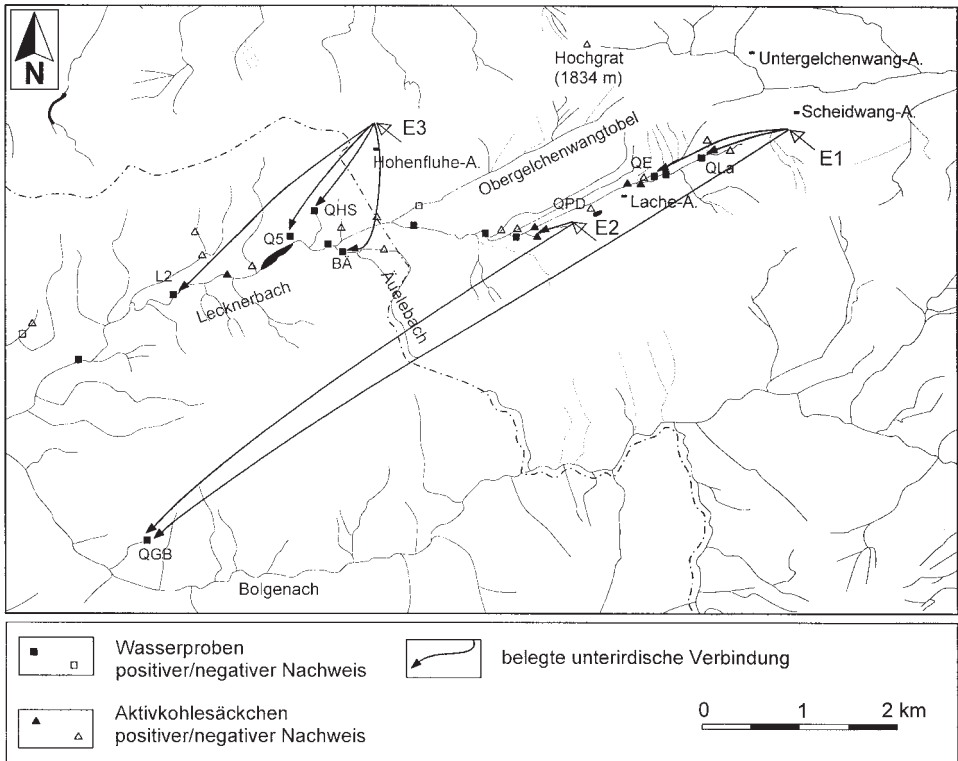


Fig. 9: Übersicht der Eingabe- und Probenabmestellen und der belegten Verbindungen. Einzelne Stellen liegen zu nahe beieinander, um getrennt dargestellt zu werden.
 Overview of the injection and sampling points and the proved underground flow paths. Some sampling points are too close to each other to be shown separately.

wendig.

Um den Durchgang der eingegebenen Markierungsstoffe quantitativ zu erfassen, wurden an 16 Quellen und Fließgewässern Wasserproben entnommen. An 10 dieser Stellen wurden zusätzlich Aktivkohlesäckchen eingehängt. An 30 weiteren Probenahmestellen, die schwer zugänglich oder von geringerem Interesse sind, wurden nur Aktivkohlesäckchen eingehängt. Die Probenahme erstreckte sich über einen Zeitraum von 50 d. In den ersten Tagen wurde rund um die Uhr beprobt, teils stündlich, danach wurden die Intervalle sukzessive verlängert. Insgesamt wurden 324 Wasserproben und 104 Aktivkohlesäckchen entnommen und im Labor der AGK spektralfluorimetrisch untersucht (vollständige Ergebnisse siehe N. GÖPPERT, 2002).

5.2. Ergebnisse

Das in die Ponordoline bei der Scheidwang-Alp (E1) eingegebene Eosin erreicht bereits nach 3 h die 800 m talabwärts gelegene Quellgruppe bei der Lache-Alp (QLa) und nur 5 h nach der Eingabe die Maximalkonzentration von 3961,8 $\mu\text{g/l}$ (Fig. 10). Daraus ergibt sich eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 286 m/h und eine dominierende von 169 m/h. Auch in der 1,5 km von der Ponordoline entfernten Estavelle (QE) wurde in den Tagen nach der Eingabe ein unregelmäßiger Durchgang mit niedrigen Konzentrationen (max. 1,0 $\mu\text{g/l}$) festgestellt.

Die nachgewiesenen Verbindungen von der Ponordoline zur Quellgruppe und zur Estavelle folgen im Wesentlichen dem Streichen der Konglomeratbänke, wobei alle drei Stellen in jeweils unterschiedlichen Bänken liegen. Die dazwischengeschalteten Mergelschichten wurden also überwunden, vermutlich entlang von Störungen, die allerdings nicht lokalisiert werden konnten.

Die Gemeindequelle an der Bolgenach (QGB) ist 7,7 km von der Eingabestelle ent-

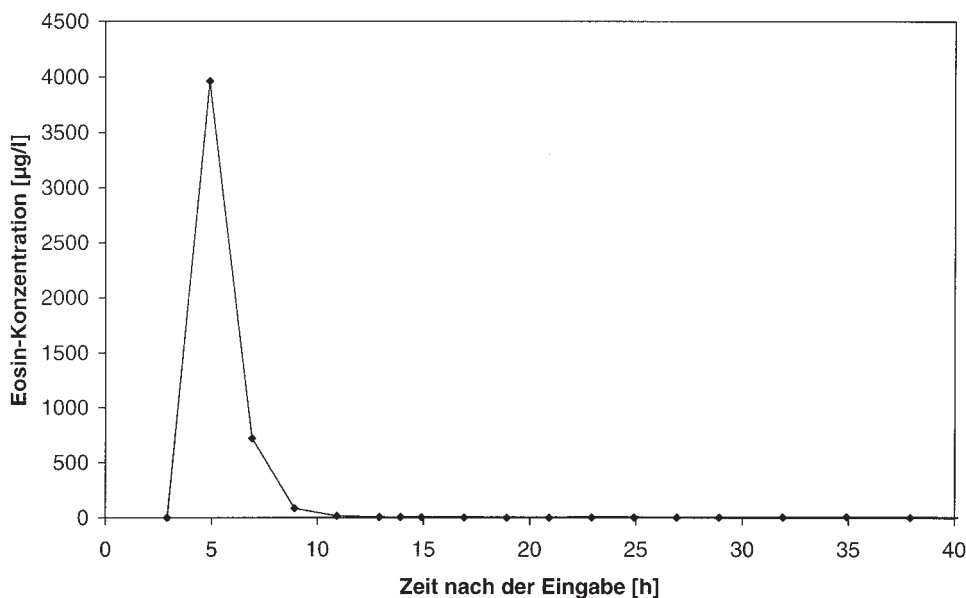


Fig. 10: Eosin-Durchgangskurve der Quellgruppe oberhalb der Lache-Alp (QLa).
Eosine breakthrough curve of the group of springs east of the Lache-Alp (QLa).

fernt und liegt außerhalb des topographischen Einzugsgebiets des Lecknertals. Dennoch wurde in dieser Quelle 4–11 d nach der Eingabe Eosin in sehr geringen Konzentrationen ($0,2 \mu\text{g/l}$) nachgewiesen. Aus der unregelmäßigen Durchgangskurve ergibt sich ein Intervall der Abstandsgeschwindigkeit zwischen 30 und 85 m/h. Das Eosin hat die gesamte Fließstrecke unterirdisch zurückgelegt. Es ist dabei zwar grob dem Streichen der Konglomeratbänke gefolgt, hat aber auch Schichtgrenzen gequert. Schließlich entspringt die Quelle den Weißach-Schichten, während im Bereich der Eingabestelle Steigbach-Schichten anstehen.

Das in der Ponordoline unterhalb der Lache-Alp (E2) eingegebene Sulforhodamin B trat bereits nach 5 h in einer Horizontaldistanz von 200–300 m westlich der Eingabestelle in einer Schlucht wieder zutage, vermutlich über mehrere Austrittsstellen direkt im Bachbett, die nicht einzeln lokalisiert werden konnten. Sulforhodamin B wurde auch in der 5,4 km entfernten Gemeindequelle an der Bolgenach (QGB) nachgewiesen, allerdings nur in Aktivkohlesäckchen, welche durch kumulative Anreicherung auch den Nachweis von Spuren erlauben, die in Wasserproben unterhalb der Nachweisgrenze liegen.

Uranin wurde in die Ponordoline oberhalb der Hohenfluh-Alp (E3) eingegeben und an insgesamt vier Probenahmestellen wiedergefunden, allerdings nur in Spuren (Fig. 11). Nach 2 bzw. 5 d erreichte es zwei Quellen am Hangfuß der Gebirgskette (QHS und Q5), 1,2 und 1,4 km südwestlich unterhalb der Eingabestelle. Dabei handelt es sich aber nur um Einzelnachweise in Konzentration von $0,006$ – $0,015 \mu\text{g/l}$, also knapp oberhalb der analytischen Nachweisgrenze.

Im Äuelebach (BÄ), der von S in den Lecknerbach mündet, wurde im Zeitraum zwischen 4 und 19 d ein lückenhafter Uranin-Durchgang mit Konzentrationen bis zu $0,023 \mu\text{g/l}$ nachgewiesen.

In einer Probenahmestelle direkt im Lecknerbach (L2) wurden 5–16 d nach der Ein-

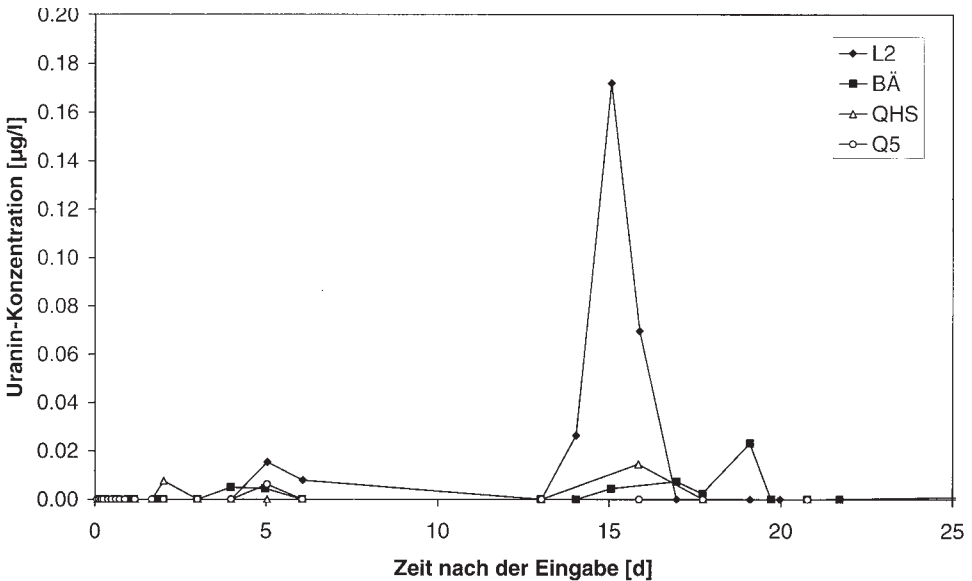


Fig. 11: Durchgangskurven von Uranin in verschiedenen Quellen und Bachläufen im Lecknertal. Uranine breakthrough curves at different springs and surface waters in the "Lecknertal".

gabe Uranin-Konzentrationen bis zu 0,17 µg/l gemessen. Das Uranin ist vermutlich an unbekannter Stelle direkt in den Bach ausgetreten.

Die Konglomeratbank, in der sich die Eingabestelle befindet, steht im Talbereich nicht mehr an, da die Schichten im Vergleich zur Hangneigung generell steiler einfallen. Das Uranin musste also auf seinem Weg von der Eingabestelle zu den Austrittsstellen durch mehrere Konglomerat- und Mergelbänke vom Liegenden zum Hangenden durchqueren und teilweise auch die Quartärbedeckung überwinden. Dies erklärt den räumlich und zeitlich diffus verteilten und stark verdünnten Wiederaustritt dieses Markierungsstoffs.

Eine analytische Modellierung der Durchgangskurven zur Bestimmung hydraulischer Kennwerte und eine Berechnung des Wiedererhalts ist aufgrund der extrem instationären Hochwasserverhältnisse während des Versuchs und der oft irregulären Durchgangskurven nicht sinnvoll. Eine Abschätzung des Wiedererhalts auf der Grundlage der Durchgangskurven und einzelner Schüttungsdaten ergab aber einen sehr hohen Wiedererhalt für Eosin und Sulforhodamin, während der Wiedererhalt von Uranin weit unter 1 % beträgt.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

6.1. Die Faltenmolasse als Karstlandschaft

Durch die Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die karbonatischen Konglomerate der Allgäuer und Vorarlberger Faltenmolasse voll entwickelte Karstlandschaften aufbauen können.

Das Gebiet Hochgrat und Lecknertal zeigt eine große Vielfalt oberirdischer Karstformen. Neben Karren und Karrenfeldern, hunderten von Dolinen, vereinzelt Karstschächten und sehr kleinen Höhlen wurden auch zwei oberirdisch weitgehend abflusslose, geschlossene Hohlformen beobachtet, die wenige Hektar groß sind und daher als Kleinpoljen bezeichnet wurden.

Einzelne dieser Formen können zwar mit glazialen Vorgängen, Massenbewegungen oder mechanischer Verwitterung bzw. Erosion in Zusammenhang gebracht werden: Eines der Kleinpoljen hat sich aus einem Kar entwickelt, vereinzelt Hohlformen könnten Toteislöcher sein, einige Spalten könnten sich durch Massenbewegungen geöffnet haben und manche Karren zeigen Übergänge zu Erosionsformen. Bei den meisten Formen ist aber eine ausschließliche oder vorwiegende Entstehung durch Karstprozesse nachweisbar: In einem der Kleinpoljen lässt sich die zeitliche Entwicklung der Verkarstung anhand eines Paläoponors belegen, viele Dolinen entsprechen dem Idealtyp eine Trichterdoline mit aktivem Ponor und viele Karren zeigen eine gleichmäßige Lösung von Bindemittel und Komponenten, die beide karbonatisch sind.

Im Gebiet gibt es zwar zahlreiche oberirdische Gewässer, diese folgen aber fast immer den Mergellagen, während Bereiche aus anstehendem Konglomerat meist unterirdisch entwässern. Viele Dolinen im Gebiet dienen als Schluckloch für Oberflächen-gewässer aus angrenzenden Mergelbereichen. Zusätzlich gibt es auch eine größere Bachschwinde und zwei Estavellen – diese treten nur in Gebieten mit gut entwickelten unterirdischen Abflussbahnen auf, also fast ausschließlich in Karstlandschaften, sehr selten auch am Rand von Gletschern, in Vulkan- und Bergsturzgebieten (N. GOLDSCHIEDER et al., 1999).

Durch Schüttungsmessungen, hydrochemische Methoden und vor allem durch einen kombinierten Markierungsversuch konnte die Existenz eines unterirdischen Ent-

wässerungsnetzes belegt werden, das sich durch hohe Fließgeschwindigkeiten und rasche Reaktion auf hydrologische Ereignisse auszeichnet. Es wurden unterirdische Fließwege mit einer Horizontaldistanz von bis zu 7,7 km nachgewiesen. Über eine kürzere Distanz wurden maximale Abstandsgeschwindigkeiten von bis zu 286 m/h eruiert. Der Versuch wurde bei extremem Hochwasser durchgeführt, bei gemäßigeren Bedingungen ist mit geringeren Geschwindigkeiten zu rechnen.

6.2. Typen der Karstentwässerung

Im Untersuchungsgebiet konnten drei Typen der Karstentwässerung unterschieden werden:

- Im Talbereich erfolgt der unterirdische Abfluss weitgehend parallel zum Streichen der Konglomeratbänke. Daher sind die Durchgänge der Markierungsstoffe dort direkt, schnell und erfolgen nahezu vollständig, also mit hohem Wiedererhalt (Fig. 10). Die Eingabestellen und die Quellen mit positivem Nachweis liegen z. T. aber nicht in derselben Konglomeratrinne, Zwischenlagen aus gering durchlässigem Mergel wurden also überwunden, wahrscheinlich entlang von Störungen, möglicherweise aber auch in Bereichen, in denen diese Lagen ausdünnen oder lateral auskeilen.
- Die Verbindung zu den Gemeindequellen an der Bolgenach belegt die Existenz weiterer Fließwege, die lokale oberirdische Wasserscheiden queren und Formationsgrenzen überschreiten können. Hier sind die Fließgeschwindigkeiten geringer, aber mit maximal 86 m/h immer noch beachtlich hoch. Der geringe Wiedererhalt an diesen Quellen legt nahe, dass diese großräumigen Fließwege nur einen geringen Teil des gesamten Fließgeschehens repräsentieren.
- Die Hochlagen der untersuchten Gebirgskette weisen zwar viele Ponore auf, die eine direkte Infiltration ins Karstnetzwerk ermöglichen, die Entwässerung dieser Bereiche wird aber dadurch erschwert, dass die Schichten im Vergleich zur Hangneigung steiler einfallen. Die Konglomeratbänke, die in den Hochlagen anstehen, sind daher im Talbereich meist unter tiefer Bedeckung. Denkbar ist hier eine unterirdische Entwässerung, die bis zum Erreichen eines Quertales dem Streichen folgt. Dieser Vorgang konnte jedoch (noch) nicht belegt werden. Der Markierungsversuch hat aber gezeigt, dass zumindest ein geringer Teil der Wässer, die in den Hochlagen infiltrieren, diffus am Hangfuß austritt (Fig. 11) und dabei durch mehrere Konglomerat- und Mergellagen aufsteigt.

6.3. Bedeutung der Ergebnisse

Da es in der Faltenmolasse am Nordrand der Alpen viele Gebiete mit vergleichbaren lithologischen, tektonischen und klimatischen Bedingungen wie im Untersuchungsgebiet gibt, ist anzunehmen, dass Karstphänomene auch dort weiter verbreitet sind, als bisher angenommen wurde. Tatsächlich wurden in Konglomeraten der USM bei Rieden (Schweiz) gut entwickelte Karstformen beschrieben (A. POCHON & F. ZWAHLEN, 2002). Auch in der Oberen Süßwassermolasse (OSM) im Einzugsgebiet des Aubaches (Schweiz) wurden eindeutige Hinweise auf ober- und unterirdische Verkarstung dokumentiert (W. BALDERER, 1989).

Die besonderen Charakteristika dieser Karstlandschaften macht die Entwicklung speziell angepasster Konzepte zum Grundwasserschutz erforderlich (N. GOLDSCHIEDER,

2002). Ein vielversprechender Ansatz hierzu wurde von A. POCHON & F. ZWAHLEN (2002) vorgeschlagen.

Die Verkarstung von Konglomeraten der Faltenmolasse könnte auch für die Hydrogeologie des gesamten Molassebeckens von Bedeutung sein (vgl. W. BALDERER, 1990). In vielen Tiefbohrungen im Molassebecken wurden überhydrostatische Porendrucke angetroffen. Diese wurden bisher durch noch nicht abgebauten tektonischen Druck bei der Versenkung unter den alpinen Deckenstapel erklärt (siehe M. MÜLLER & F. NIEBERDING, 1995). Profile quer zum Streichen des Molassebeckens zeigen, dass sich die steil einfallenden Konglomerat-Formationen der Faltenmolasse, die am Alpen-nordrand Gebirgsketten bis fast 2000 m Höhe bilden, bis in Tiefen von einigen Kilometern in den Untergrund fortsetzen. Es ist daher denkbar, dass die Überdrücke in den Tiefbohrungen durch hydraulischen Kontakt mit den hochgelegenen Karstsystemen der Faltenmolasse zu erklären sind.

Auch außerhalb der Alpen existieren eindrucksvolle Beispiele für die Verkarstung karbonatischer Konglomerate in Molassebecken. In N. GÖPPERT (2002) sind Beispiele von beiderseits der Pyrenäen, aus der Betischen Kordilliere und den Dinariden dokumentiert. Es sind Höhlen von bis zu 8 km Länge, 202 m tiefe Schächte und Quellen mit einer Maximalschüttung von bis zu 10 m³/s beschrieben.

Eine umfassende Untersuchung der Karsterscheinungen und Hydrogeologie karbonatischer Konglomerate in den Molasse-Landschaften am Nordrand der Alpen und in anderen europäischen Gebirgen sowie eine Bewertung ihrer Bedeutung für den Grundwasserschutz steht noch aus.

Zusammenfassung

Die dominierenden Gesteine in weiten Teilen der Allgäuer und Vorarlberger Faltenmolasse sind Konglomerate („Nagelfluh“), die oft extrem grobkörnig sind und deren Bindemittel und Komponenten überwiegend aus karbonatischen Anteilen bestehen. Obwohl diese Gesteine aufgrund ihres hohen Karbonatanteils als verkarstungsfähig gelten können, finden sich in den Erläuterungen zu den amtlichen geologischen Karten keine dezidierten Hinweise auf Karsterscheinungen. Tatsächlich wurde im Rahmen neuerer Arbeiten der TU München jedoch eine Vielzahl an Karstformen beobachtet.

Im Rahmen der vorliegenden Studie sollten daher in einem Pioniergebiet in der Faltenmolasse die geomorphologischen Karstformen erstmals systematisch kartiert und ihr Zusammenhang mit den geologischen Strukturen analysiert werden. Außerdem sollte überprüft werden, ob den oberirdisch erkennbaren Formen auch ein unterirdisches Karstnetzwerk gegenübersteht.

Im Gebiet wurden Karren und Karrenfelder, hunderte von Dolinen und zwei geschlossene, oberirdisch weitgehend abflusslose Hohlformen mit ebenem Boden beobachtet, die hier als „Kleinpolje“ bezeichnet werden. Fast alle diese Formen sind überwiegend durch Verkarstung entstanden; untergeordnet sind auch andere Prozesse beteiligt. Die Existenz von Schwinden, Estavellen und Quellen mit hohen Schüttungsschwankungen weist auf ein unterirdisches Entwässerungssystem mit starken hydraulischen Reaktionen auf hydrologische Ereignisse hin. Durch einen kombinierten Markierungsversuch bei Hochwasser konnten unterirdische Abstandsgeschwindigkeiten bis zu 286 m/h und Fließwege bis zu 7,7 km Horizontaldistanz belegt wer-

den.

Da es im Bereich der Faltenmolasse weite Gebiete mit ähnlichen lithologischen Bedingungen gibt, ist auch dort mit Karsterscheinungen zu rechnen. Abgesehen von einigen Gebieten in der Schweiz wurden diese bisher meist ignoriert, jedenfalls aber nicht angemessen bei der hydrogeologischen Bewertung und bei der Ausweisung von Schutz-zonen berücksichtigt.

Literatur

- APPEL, D. (1992): Erläuterungen zur geologischen Karte des Gebietes südlich von Weiler im Allgäu.– Unveröff. Diplomkartierung am Lehrst. f. Geologie der TU München, 71 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- BALDERER, W. (1989): Hydrochemie der Quellen der Oberen Süßwassermolasse im Einzugsgebiet des Aubaches (Schweiz).– Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 40, 49–74, Graz.
- BALDERER, W. (1990): Hydrogeologische Charakterisierung der Grundwasservorkommen innerhalb der Molasse der Nordostschweiz aufgrund von hydrochemischen und Isotopenuntersuchungen.– Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 41, 35–104, Graz.
- BAYERISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT (Hrsg., 1982): Topographische Karte 1 : 50 000 Blatt 8524 Lindau (Bodensee).– München.
- BAYERISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT (Hrsg., 1991): Topographische Karte 1 : 25 000 Blatt 8525/26 Balderschwang.– München.
- BAYERISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT (Hrsg., 1994): Topographische Karte 1 : 50 000 Blatt 8526 Immenstadt i. Allgäu.– München.
- BEIHL, T. (1991): Die Geologie auf Blatt Isny im Allgäu/Süd, Teilblatt SE, mit benachbarten Randgebieten und Untersuchungen zur Genese mächtiger verwitterter Deckschichten auf jungen glazialen Ablagerungen im Westallgäu.– Unveröff. Diplomarbeit und Diplomkartierung am Lehrst. f. Geologie der TU München, 133 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- BOSCH, M. (1999): Geologie der Umgebung von Marktoberdorf im Allgäu (mit hydrogeologischem Schwerpunkt).– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 168 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, München.
- BRAMMER, S. (1994): Erläuterung zur geologischen Karte 1 : 10 000 des Gebietes östlich von Nesselwang im Ostallgäu (Helvetikum, Faltenmolasse, Quartär).– Unveröff. Diplomkartierung am Lehrst. f. Geologie der TU München, 133 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- BÜHRING, C. (1993): Erläuterung des Gebietes nördlich der Salmaser Höhe (Subalpine Molasse, Quartär) zwischen Oberstaufen und Missen (Allgäu).– Unveröff. Diplomkartierung am Lehrst. f. Geologie der TU München, 70 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- DEGELMANN, S. (1991): Geologie der Umgebung des Wengener Tals (Westallgäu), unter besonderer Berücksichtigung der Oberen Meeresmolasse zwischen dem Sonneneckzug und dem Eistobel (Obere Argon).– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 116 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- DREYBRODT, W. (2000): Equilibrium Chemistry of Karst Waters in Limestone Terranes.– In: KLIMCHOUK, A., D. C. FORD, A. N. PALMER & W. DREYBRODT (Hrsg., 2000): Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers.– 126–135, Huntsville, Alabama, USA (National Speleological Society, Inc.).
- GEBAUER, S. (1998): Erläuterungen zur Geologischen Karte der Umgebung des Hopfensees bei Füssen im Ostallgäu, mit sedimentpetrographischen Untersuchungen an spät- bis postglazialen Sedimenten des Hopfensees.– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 112 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- GOLDSCHIEDER, N. (2002): Hydrogeology and vulnerability of karst systems – examples from the Northern Alps and Swabian Alb.– Diss., Univ. Karlsruhe, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften, 236 S., Karlsruhe, [<http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/2002/bio-geo/3/3.pdf>].

- GOLDSCHIEDER, N., J.-P. ORTH, K. VATER & H. HÖTZL (1999): Die Schwarzwasserhöhle – eine hydrogeologisch bedeutsame Estavelle im alpinen Karstgebiet Hochifen-Gottesacker (Kleinwalsertal, Vorarlberg, Österreich).– *Laichinger Höhlenfreund*, **34** (2), 69–96, Laichingen (Höhlen- und Heimatverein Laichingen e.V.).
- GÖPPERT, N. (2002): Karsterscheinungen und Hydrogeologie karbonatischer Konglomerate der Subalpinen Molasse im Gebiet Hochgrat/Lecknertal (Bayern/Vorarlberg).– Unveröff. Diplomarbeit am Lehrst. f. Angewandte Geologie der Univ. Karlsruhe, 96 S., 3 Kt., Karlsruhe.
- HAUTMANN, A. (1998): Erläuterungen zur geologischen Karte der Umgebung von Riefensberg bei Krumbach, Vorarlberg (Faltenmolasse, Quartär), mit speziellen Untersuchungen an Seesedimenten bei Bach im alpinen Lechtal.– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 115 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- IRMLER, R. (2001): Erläuterungen zur geologischen Karte des oberen Weißachtals südwestlich von Immenstadt im Allgäu (Faltenmolasse, Quartär), mit speziellen Untersuchungen zur Ursache von Hangbewegungen.– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 77 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, München.
- JERZ, H. (1974): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 8327 Buchenberg.– 181 S., 1 geol. Kt., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- KANZOCK, A. (1995): Zur Geologie des Hirschberggebietes bei Bregenz (Vorlandmolasse, Quartär) mit lithostratigraphischen Untersuchungen in der Oberen Meeresmolasse.– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 158 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- KUHNERT, Ch. & W.-M. ROHR (1975): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 8230 Lechbruck.– 99 S., 1 geol. Kt., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- KUHNERT, Ch., R. OHM, K. BADER, H. JERZ, E. HOHENSTATTER, M. SCHUCH & J.-P. WROBEL (1974): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 8330 Roßhaupten.– 102 S., 1 geol. Kt., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- LEMCKE, K. (1988): Das Bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit.– *Geologie von Bayern*, **1**, 175 S., Stuttgart (Schweizerbart).
- MUHEIM, P. F. (1934): Die subalpine Molassezone im östlichen Vorarlberg.– *Eclogae geol. Helv.*, **27**, 181–297, Basel.
- MÜLLER, F. (1952): Die geologischen Verhältnisse des Blattes Buchenberg (Bayerisches Allgäu).– *Geologica Bavarica*, **13**, 24 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MÜLLER, M. & F. NIEBERDING (1995): Die überhydrostatischen Porendrücke in der Bohrung Hindelang 1 (Allgäuer Alpen) und ihre Beziehung zur Umgebung.– *Geologica Bavarica*, **100**, 167–174, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- NEUBERT, J. (1999): Erläuterungen zur geologischen Karte der Gemeinde von Stötten am Auerberg (Molasse/Quartär), mit einer speziellen Darstellung der hydrogeologischen Verhältnisse.– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 147 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, München.
- PAST, B. (2001): Erläuterungen zur geologischen Karte des Gebietes südwestlich des Alpsees bei Immenstadt im Allgäu (Faltenmolasse, Quartär), mit einer speziellen hydrogeologischen Darstellung des Landkreises Lindau.– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 125 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, München.
- POCHON, A. & F. ZWAHLEN (2002): Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré.– *Guide pratique*, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEPF).– 81 S., Bern.
- PRÖMM, H. (1991): Geologische Karte des Gebietes zwischen Röthenbach und Oberreuthe im Westallgäu (Molasse, Quartär), unter besonderer Berücksichtigung der Oberen Meeresmolasse.– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 116 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- ROGOZINSKI, Th. (1998): Erläuterungen zur Geologischen Karte des Gebietes zwischen Oberstaufen und dem Hochgrat im Allgäu (Faltenmolasse, Quartär), mit speziellen Untersuchungen an fossilen Karseen der Hochgratkette.– Unveröff. Diplomkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 106 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- SALVADOR, A. (Hrsg., 1994): *International stratigraphic guide – a guide to stratigraphy, classification, terminology and procedure.*– 2. Aufl., 214 S., New York.

- SCHEIDHAMMER, M. (1994): Beiträge zur Geologie, Ingenieurgeologie und Talgeschichte der Umgebung von Röthenbach (Westallgäu).– Unveröff. Diplomarbeit und Diplommkartierung am Lehrst. f. Geologie der TU München, 100 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- SCHOLZ, H. (1993): Geologischer Bau und Landschaftsgeschichte des Landkreises Lindau.– Begleit- heft zur geologischen Übersichtskarte 1 : 50 000 des Landkreises Lindau, Sonderbericht im 97. Berichtsband des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schwaben, 56 S., 1 geol. Kt., Augsburg.
- SCHOLZ, H. (1999): Die „klassische“ Molasse-Gliederung vom Südrand des Molassebeckens in Süd- westbayern – bewährt oder problematisch?.– N. Jb. Geol. Paläont Abh., 214 (3), 391–413, Stutt- gart.
- SCHOLZ, H. (2000): Die tertiären Grobschüttungen am Südrande des Molassebeckens im Allgäu (Süd- westbayern) – eine Synopsis.– Katzung-Festschrift, N. Jb. Geol. Paläont Abh., 218 (1/2), 61–84, Stuttgart.
- SCHOLZ, H. & M. STROHMENGER (1999): Dolinenartige Sackungsstrukturen in den Molassebergen des südwestbayerischen Alpenvorlandes.– Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F., 81, 275–283, Stuttgart.
- SCHÜTZ, J. (1991): Mineralspektren von Molasse und Flysch im Gunzesrieder Achtal.– Materialien zur Geographie, 18, 109 S., Mannheim (Geographisches Institut der Universität Mannheim).
- SCHWERD, K. (1983): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 8328 Nesselwang West.– 192 S., 1 geol. Kt., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- SCHWERD, K., R. EBEL & H. JERZ (1983): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 8427 Immenstadt i. Allgäu.–258 S., 1 geol. Kt., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- STROHMENGER, M. (1991): Zur Geologie der Umgebung des Eistobels (Allgäu), unter besonderer Be- rücksichtigung mikrofazieller Untersuchungen an Konglomeraten der Oberen Meeresmol- lasse.– Unveröff. Diplommkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU Mün- chen, 177 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- STROHMENGER, M. (1998): Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Gebiet südlich von Isny im voralpinen Westallgäu (Blatt Nr. 8326 Isny im Allgäu Süd).– Diss. TU München, 336 S., 1 geol. Kt. 1 : 25 000, Garching.
- VOLLMAYR, Th. (1958): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 8426 Oberstaufen.– 41 S., 1 geol. Kt., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- VOLLMAYR, Th. & J. H. ZIEGLER (1976): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 8425 Weiler i. Allgäu.– 76 S., 1 geol. Kt., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- WASSERRAB, Th. (1999): Zur Geologie der Umgebung von Wald im Ostallgäu. Sedimentpetrogra- phische Untersuchungen an den Molassesandsteinen des Kartiergebietes.– Unveröff. Di- plommkartierung und Diplomarbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 168 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, München.
- WEISS, S. (1991): Zur Geologie des Ettenberg Riedels südwestlich von Kaufbeuren.– Unveröff. Di- plommkartierung am Lehrst. f. Geologie der TU München, 87 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Gar- ching.
- WIMMER, A. (1998): Erläuterungen zur Geologischen Karte des Gebietes südwestlich von Oberstaufen im Allgäu (Faltenmolasse, Quartär), mit besonderen Untersuchungen zur Stratigraphie der Unteren Süßwassermolasse und des Quartärs.– Unveröff. Diplommkartierung und Diplom- arbeit am Lehrst. f. Geologie der TU München, 189 S., 1 geol. Kt. 1 : 10 000, Garching.
- ZACHER, W. (1985): Geologische Karte von Bayern 1 : 100 000, Blatt 670 Oberstdorf, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

Summary

Coarse-grained conglomerates, which predominantly consist of carbonate components in a car- bonate matrix, make up significant parts of the Folded Molasse zone (also referred to as Sub-Alpine Molasse) in Southwest Bavaria and Western Austria, at the northern margin of the Alps. Although these rocks are predisposed to karstification, due to their mineralogical composition, there are no recorded karst features in the official geological descriptions of the area. However, a large variety of karst landforms can be observed in the field on areas made of carbonate conglomerates.

Within the framework of this study, the relation between geomorphological karst landforms and geological structure was mapped and analysed systematically in a selected test site. The presence of an underground karst drainage network was checked for and its hydrogeological properties were investigated by means of a combined tracer test. Besides karrenfeld and hundreds of dolines, two closed depressions with a flat floor were observed. These small poljes drain underground via swallow holes. It was possible to prove that most of these landforms were predominantly formed by karst processes, while mass movements, erosion and glacial processes are less significant. The presence of swallow holes, estavelles and springs with high discharge variations indicate the presence of an underground drainage network with strong hydraulic reactions to hydrologic events. A combined tracer test was undertaken during a storm event; the results of this test gave effective groundwater flow velocities up to 286 m/h and flow path horizontal distances up to 7.7 km.

As many areas in the Folded Molasse zone of the Northern Alps show similar lithological characteristics, karstification should be expected there as well. However, apart from some areas in Switzerland, karstification has to date gone unrecorded. As karst groundwaters are particularly vulnerable to contamination from surface activities, they require special protection. The karstification of carbonate conglomerates should consequently be investigated in more detail and has to be considered for the delineation of groundwater protection zones.

Dank

Wir bedanken uns

- bei der Gemeinde Hittisau für die finanzielle Unterstützung der Geländearbeit;
- bei Herrn Konrad SCHWARZ (Bürgermeister von Hittisau) sowie Herrn Paul BECHTER (Wassermeister) und der Familie Toni & Rosi BECHTER (Lache-Alp) für die vielfältige und freundliche Hilfe;
- bei allen Helfern, die während des Markierungsversuchs unter äußerst widrigen Bedingungen Wasserproben genommen haben;
- beim Landratsamt Oberallgäu und der Bezirkshauptmannschaft Bregenz für die rasche Genehmigung des Markierungsversuchs in diesem hart umkämpften Jagdpachtgebiet;
- beim Landeswasserbauamt Bregenz, beim Amt der Vorarlberger Landesregierung und beim Bayerischen Landesvermessungsamt München für die Bereitstellung von

Daten, Karten und Orthofotos.

Stichwörter: Faltenmolasse, Konglomerat, Karst, Alpen, Markierungsversuche
Keywords: Folded Molasse, conglomerate, karst, Alps, tracer tests