

# Hydrogeologie und Trinkwasserschutz im alpinen Karstsystem der Winterstaude (Marktgemeinde Bezau, Bregenzerwald, Vorarlberg, Österreich)

von Nico Goldscheider, Christoph Neukum & Heike Werz

## Zu den Autoren

Dipl.Geol. Nico Goldscheider, geboren 1969, Studium der Geologie an der Universität Karlsruhe, 1996/97 Diplomarbeit über die Hydrogeologie des Gottesackers. Seit 1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Hötzl am Lehrstuhl für Angewandte Geologie Karlsruhe (AGK), dort zuständig für Markierungsversuche, viele angewandte Forschungsprojekte, Mitarbeit an einer europäischen Arbeitsgruppe über Vulnerabilitätskartierung in Karstgebieten, laufende Dissertation über Hydrogeologie und Grundwasserschutz in alpinen Karstsystemen. Leiter des Bezau-Projekts und Betreuer der Diplomarbeiten von Christoph Neukum und Heike Werz.

Dipl.Geol. Christoph Neukum, geboren 1972, Studium der Geologie an der Universität Karlsruhe. Im Sommer 2000 Diplomarbeit über die Tektonik und Karstentwässerung im Gebirgsmassiv der Winterstaude. Seit März 2001 Mitarbeiter der AGK mit Schwerpunkt auf Markierungstechniken und Grundwasserschutz in Karstgebieten.

Dipl.Geol. Heike Werz, geboren 1974, Studium der Geologie an der Universität Karlsruhe. Im Sommer 2000 Diplomarbeit über Geologie und Grundwasserschutz im Gebiet Bezau und Winterstaude. Seit 2001 Dissertation am Lehrstuhl für Angewandte Geologie im Rahmen eines multilateralen Projekts zur Erkundung, Untersuchung und Bewertung von Trinkwasserressourcen im Nahen Osten.

Siehe auch: <http://www.agk.uni-karlsruhe.de/>

## Inhaltsverzeichnis

1. <i>Einführung</i>	12
2. <i>Geographischer Überblick</i>	15
2.1 Lage, Topographie und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes	15
2.2 Klima	15
3. <i>Bau und Werden der Landschaft</i>	15
3.1 Geologischer Rahmen	15
3.2 Entstehung der Gesteine in der Kreide (Stratigraphie)	17
3.3 Entstehung der geologischen Strukturen im Tertiär (Tektonik)	19
3.4 Formung der Landschaft im Quartär	22
4. <i>Grundwasser, Quellen und Gewässernetz</i>	23
4.1 Hydrogeologische Eigenschaften der Gesteine	23
4.2 Quellen und Gewässernetz	26
5. <i>Temperatur, Inhaltsstoffe und Qualität der Quellwässer</i>	31
5.1 Überblick	31

VORARLBERGER  
NATURSCHAU

11

SEITE 9–58

Dornbirn 2002



5.2	Wassertemperatur und physiko-chemische Kennwerte	31
5.3	Mineralstoffe	35
5.4	Bakteriologie	35
6.	<i>Erkundung der unterirdischen Fließwege durch Markierungsversuche</i>	36
6.1	Grundsätzliches zu Markierungsversuchen	36
6.2	Überblick über den Markierungsversuch im Winterstaude-Gebiet	37
6.3	Eingabe der Markierungsstoffe	38
6.4	Probenahme und Analytik	40
6.5	Ergebnisse	41
7.	<i>Verletzlichkeit und Schutz des Grundwassers</i>	45
7.1	Landnutzung und Grundwasserschutz	45
7.2	Die besondere Situation im Karst und das Konzept der Vulnerabilität	46
7.3	Die PI-Methode und der Europäische Ansatz zur Vulnerabilitätskartierung	47
7.4	Vulnerabilitätskartierung im Untersuchungsgebiet	48
8.	<i>Schlussfolgerungen</i>	49
8.1	Zusammenhang zwischen geologischer Struktur und Karstentwässerung	50
8.2	Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers	53
8.3	Einzugsgebiete der zur Trinkwasserversorgung von Bezau relevanten Quellen	54
8.4	Vorschläge zum Schutz der Trinkwasserquellen	54
9.	<i>Danksagung</i>	56
10.	<i>Literatur</i>	57

### **Abstract**

The community of Bezau in the Western Austrian Alps receives its drinking water from springs at the base of the folded alpine karst system Winterstaude. However, there are problems both with the microbiological quality and with the quantity of the water. In order to develop a strategy for sustainable drinking water supply and protection, a hydrogeological research project was set up. Geological mapping and hydrogeological investigation showed that there are two karst aquifers in the area which are underlain, overlain and separated from each other by marl formations. A tracer test with seven injection points and 51 sampling points proved that the two aquifers are hydraulically connected via faults. The troughs of the plunging synclines were found to form the main flow paths, while the anticlines form local watersheds. The investigations allowed the catchments of the springs to be delineated. A groundwater vulnerability map using the PI method helped to find a compromise between land-use and drinking water protection.

Key words: hydrogeology, alpine karst, tracer tests, groundwater protection, vulnerability mapping, Bezau, Vorarlberg, Austria

## Zusammenfassung

Die Marktgemeinde Bezau im Bregenzerwald bezieht ihr Trinkwasser aus zwei Quellen am Fuß des Gebirgszuges der Winterstaude. Die Wasserqualität der ersten Quelle ist zwar meist gut, in niederschlagsarmen Zeiten liefert sie aber zu wenig Wasser. In diesem Fall wird zusätzliches Trinkwasser aus einer zweiten Quelle entnommen. Diese schüttet zwar immer genügend Wasser, das aber häufig mikrobiell belastet ist und daher gefiltert und entkeimt werden muss, bevor es ins Leitungsnetz eingespeist werden kann. Eine dritte Quelle wird bisher noch nicht zur Trinkwassergewinnung verwendet, wird aber als mögliche Ergänzung oder Alternative zu den bisherigen Quellen angesehen.

Für die Marktgemeinde Bezau sollte daher ein nachhaltiges Konzept zum Schutz der genutzten und nutzbaren Trinkwasserquellen erarbeitet werden. Um aber eine Quelle zu schützen, muss ihr Einzugsgebiet ermittelt werden – und das ist in Gebieten mit komplizierten geologischen Verhältnissen gar nicht so einfach. Daher wurde ein umfangreiches hydrogeologisches Untersuchungsprogramm ins Leben gerufen.

Zunächst wurde der Gebirgszug der Winterstaude und die angrenzenden Höhenrücken detailliert geologisch kartiert. Das Gebiet gehört zur Vorarlberger Säntis-Decke und wird von gefalteten Kalksteinen und Mergeln aus der Kreidezeit aufgebaut. Die beiden Kalkstein-Formationen sind verkarstet und können daher Grundwasser aufnehmen, speichern und weiterleiten. Die Mergel wirken dagegen als Grundwasserstauer unter, zwischen und lokal auch über den beiden Karstgrundwasserleitern. Das Gewässernetz und alle Quellen wurden bei unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen beobachtet, die Abflüsse und Schüttungen wurden regelmäßig gemessen, und in Wasserproben wurden alle Inhaltsstoffe analysiert.

Durch die geologischen und hydrologischen Voruntersuchungen konnte bereits eine Modellvorstellung über die Einzugsgebiete der Quellen und die unterirdischen Fließwege entwickelt werden. Um diese zu überprüfen, wurde ein kombinierter Markierungsversuch durchgeführt. Dabei wurden an sieben Stellen verschiedene Fluoreszenzfarbstoffe (Tracer) eingegeben und an allen Quellen wurden regelmäßig Proben entnommen, um einen möglichen Durchgang dieser Tracer zu erfassen.

Durch den Markierungsversuch konnte bewiesen werden, dass die erste genutzte Quelle versickerndes Oberflächenwasser aus einem angrenzenden Bach fördert, die zweite Quelle dagegen Grundwasser aus den beiden verkarsteten Kalkstein-Formationen erhält, und die dritte, noch nicht genutzte Quelle aus den Sanden und Kiesen im Bezauer Talraum gespeist wird. Ein direkter Einfluss einzelner Schadstoffeinträge auf die Trinkwasserquellen konnte nachgewiesen werden. Durch den Markierungsversuch konnte auch der Zusammenhang zwischen Faltenbau und Karstentwässerung charakterisiert werden: Die Tiefenlinien der abtauchenden Synklinalen (Faltenmulden) sind die wichtigsten Fließwege, während die Antiklinalen (Faltensättel) lokale Wasserscheiden bilden.

Um innerhalb der Einzugsgebiete der Quellen eine weitere Differenzierung vornehmen zu können, wurde die Vulnerabilität (Verletzlichkeit) des Grundwassers gegenüber Schadstoffeinträgen kartiert. Auf diesen Grundlagen konnten konkrete Vorschläge für die Ausweisung von Trinkwasserschutzzonen formuliert werden.

## 1. Einführung

Der größte Teil unseres Trinkwassers wird aus Grundwasser gewonnen, das in Quellen natürlich austritt oder aus Brunnen gefördert wird. Ein bedeutender Anteil der weltweiten Trinkwasservorkommen ist in Karstlandschaften gespeichert. Eine typische Karstlandschaft wird aus Kalkstein aufgebaut. Ein Großteil des Regenwassers versickert dort über Felsspalten, Schächte, Dolinen und Bachschwinden im Untergrund, so dass die Landschaft an der Oberfläche meist karg und trocken wirkt. Dagegen sind im Untergrund oft große Wassermengen vorhanden, die über Röhren, Spalten und Höhlen zu großen Quellen fließen. Im Wasser enthaltene Säuren, vorwiegend Kohlensäure und Huminsäuren, greifen den Kalkstein an und führen so zur Bildung der beschriebenen Lösungshohlformen – ein Vorgang der als Verkarstung bezeichnet wird. Auch andere lösliche Gesteine, wie Dolomit, Marmor, Kalksandstein, Gips und Steinsalz, können verkarsten. In der Hydrogeologie gilt jeder Gesteinskörper als verkarstet, in dem die ursprünglich vorhandenen Klüfte durch Lösung erweitert wurden, auch wenn an der Geländeoberfläche keine typische Karstlandschaft zu erkennen ist.

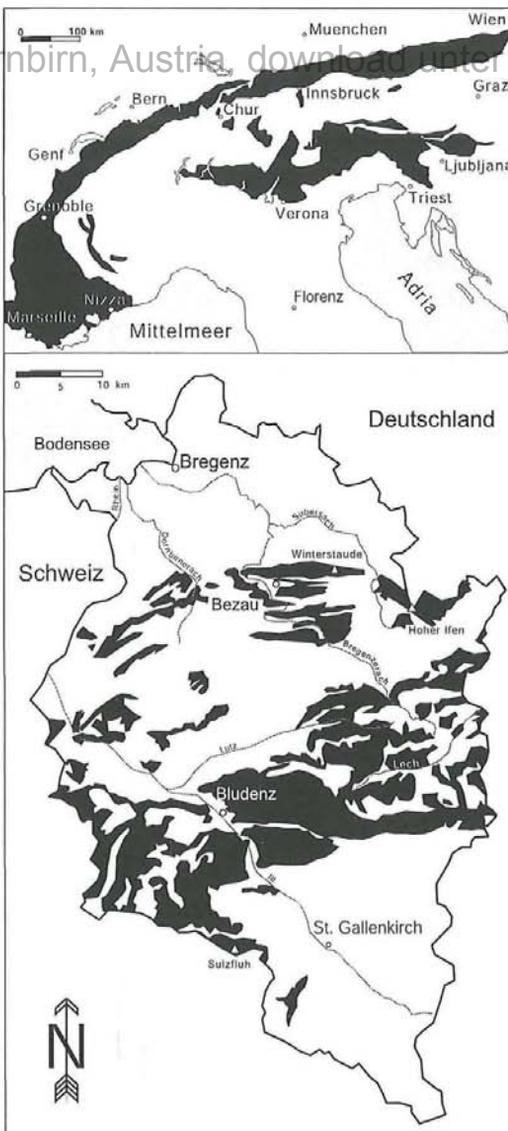
Viele Gebiete der Alpen werden aus Kalkstein und Dolomit aufgebaut und sind daher als Karstlandschaft anzusprechen (*Abb. 1*): weite Teile der Berner und Glarner Alpen, das Säntisgebiet, die Allgäuer und Lechtaler Alpen, das Wettersteingebirge, der Dachstein, das Tennengebirge, die Dolomiten und viele mehr (TRIMMEL 1998). Entsprechend groß ist die Bedeutung für die Trinkwasserversorgung: Allein Österreich gewinnt etwa 50 % seines Trinkwassers aus Karstgebieten (COST 65, 1995). Große Städte im Alpenraum wie Wien, Innsbruck und Salzburg werden überwiegend mit Karstwasser versorgt. Gleichzeitig sind Karstgebiete besonders gefährdet: Schadstoffe können leicht ins Grundwasser gelangen und sich dort schnell und ungehindert ausbreiten, ohne dabei nennenswert gefiltert oder abgebaut zu werden (HÖTZL 1996). Aus diesen Gründen kommt der hydrogeologischen Erforschung und dem Schutz der Grundwasservorkommen im alpinen Karst eine besondere Bedeutung zu.

In Vorarlberg wird etwa ein Drittel der Landesfläche von Karstlandschaften aufgebaut, die in zwei West-Ost-streichenden Zonen auftreten (KRIEG 1988, *Abb. 1*). Die südliche Zone gehört geologisch zu den Ostalpen. Hier baut vor allem der Hauptdolomit aus der Triaszeit das Lechquellengebirge und das Rätikon auf. Das eindrucksvolle Karstplateau der Sulzfluh nimmt eine Sonderstellung ein, da es geologisch zur Zone des Penninikums gehört. In der nördlichen Landeshälfte befindet sich die Zone des Helvetikums, die geologisch zu den Westalpen zählt. Dort ist der Schrattenkalk aus der Kreidezeit das wichtigste Karstgestein. Er baut unter anderem das Hochifen-Gottesacker Gebiet auf, die bekannteste und spektakulärste Karstlandschaft Vorarlbergs, die in den letzten Jahren intensiv hydrogeologisch untersucht wurde (GOLDSCHIEDER 1998, GOLDSCHIEDER & HÖTZL 2000). Auch die westlich anschließenden Gebirgszüge des Bregenzerwaldes werden vom Schrattenkalk und anderen Kalkstein-Formationen des Helvetikums aufgebaut und sind daher Karstlandschaften, auch wenn dort die Karstformen nicht so auffällig sind.

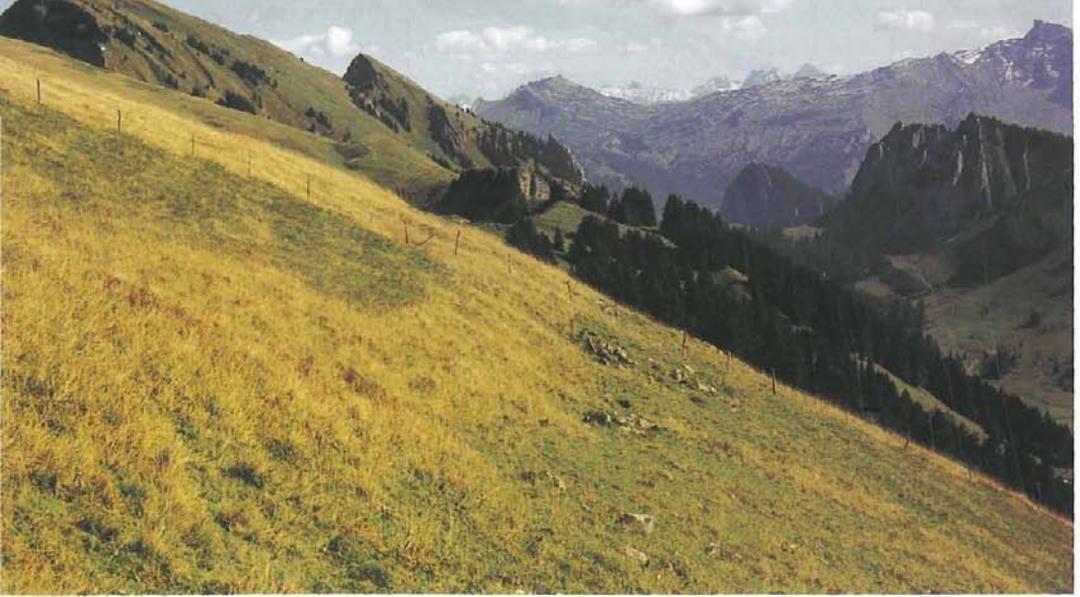
Ein Beispiel hierfür ist der Gebirgszug der Winterstaude bei Bezau (*Abb. 2*).

12 Im Gegensatz zur kargen und wild zerklüfteten Felsenlandschaft des Gottes-

Abb. 1: Verbreitung von Karstgebieten in den Alpen und in Vorarlberg (nach BÄTZING 1997 und KRIEG 1988).



ackers sieht dieser Gebirgszug auf den ersten Blick zwar nicht wie eine Karstlandschaft aus, wird aber aus verkarsteten Kalkstein-Formationen aufgebaut und zeigt die entsprechenden hydrogeologischen Eigenschaften. Die Marktgemeinde Bezaun bezieht ihr Trinkwasser aus zwei Quellen am Fuß des Gebirgszuges der Winterstaude. Dabei gibt es jedoch Probleme mit der Menge und Qualität des Quellwassers. Die Wasserqualität der ersten Quelle ist zwar meist gut, in trockenen Perioden fördert sie jedoch zu wenig Wasser. In diesem Fall wird zusätzliches Wasser aus einer zweiten Quelle gewonnen, die stets genügend Wasser führt, das allerdings häufig stark mikrobiell belastet ist. Daher muss das Quellwasser gefiltert und entkeimt werden, bevor es als Trinkwasser ins Leitungsnetz eingespeist werden kann.



**Abb. 2:** Blick vom Bereich der Ht. Niederealpe nach Osten; im Mittelgrund von links nach rechts Winterstauden, Hohe Kirche, Schreibersattel und Luguntenkopf; dahinter Gottesacker und Hoher Ifen; ganz im Hintergrund sind die Gipfel der Allgäuer Alpen zu erkennen.

Für die Marktgemeinde Bezau sollte daher ein Konzept zum Schutz der genutzten Quellen erarbeitet werden. Zusätzlich sollten alternative Trinkwasserquellen vorgeschlagen werden. In einem alpinen Karstsystem mit komplizierten geologischen Verhältnissen sind hierfür umfangreiche Untersuchungen notwendig. Daher wurde ein hydrogeologisches Projekt ins Leben gerufen. Dieses beinhaltet eine geologische Kartierung, eine chemische und mikrobiologische Untersuchung aller Quellwässer, die Abgrenzung der Einzugsgebiete wichtiger Quellen, die Charakterisierung der unterirdischen Fließwege, die Erfassung möglicher Schadstoffeinträge und die Kartierung der Verletzlichkeit des Grundwassers gegenüber Schadstoffeinträgen.

Das Projekt wurde am Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (AGK), Abteilung Hydrogeologie Prof. Dr. Heinz HÖTZL, im Rahmen der Diplomarbeiten von Heike WERZ und Christoph NEUKUM unter der Leitung von Dipl.-Geol. Nico GOLDSCHIEDER bearbeitet. Dabei bestand eine enge und sehr konstruktive Zusammenarbeit mit der Marktgemeinde Bezau, dem Ingenieurbüro RUDHARDT + GASSER, dem Umweltinstitut Vorarlberg, dem Landeswasserbauamt Bregenz und der Vorarlberger Naturschau.

Im Rahmen des Projektes wurde für Bezau ein detailliertes Konzept zum Quellschutz erarbeitet (WERZ 2001, GOLDSCHIEDER et al. 2001). Gleichzeitig ist das Projekt ein Beitrag zur Landeskunde Vorarlbergs und hat aufgrund der großen Verbreitung alpiner Karstgebiete und deren Bedeutung für die Trinkwasserversorgung den Charakter einer Pilotstudie. Daher wurde die Arbeit jeweils zur Hälfte von der Marktgemeinde Bezau und von der Vorarlberger Naturschau finanziert.

## 2. Geographischer Überblick

### 2.1 Lage, Topographie und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes

Die Marktgemeinde Bezau liegt im Zentrum des Bregenzerwaldes in einem sanft nach Westen geneigten Talraum auf einer Höhe von 650 m am südlichen Hangfuß eines Ost-West verlaufenden Gebirgszuges. Dieser beginnt im Westen mit dem Klausberg (961 m), steigt über Sattel (1182 m) und Hintere Niedere (1711 m) zur Winterstauden (1877 m) an und setzt sich von dort über die Hohe Kirche (1747 m) abfallend nach Osten fort. In diesem Artikel wird der gesamte Gebirgszug nach der Winterstauden benannt. Im Westen wird der Gebirgszug durch das Tal der Bregenzerach durchschnitten, im Osten durch das Subersachtal. Südlich angrenzend und parallel zum Gebirgszug der Winterstauden folgt das Grebentobel, der Bergrücken des Hälekopf (1614 m) und Luguntenkopf (1702 m), das Rimsgrund-Tal und der flache Bergrücken des Exhalder. Die Nordflanken sind oft sehr steil und werden teils von senkrechten Felswänden gebildet, während die Südhänge sanft bis mäßig steil abfallen.

Da es in diesem Projekt um die Trinkwasserquellen von Bezau geht, wurde insbesondere das vermutete Einzugsgebiet dieser Quellen untersucht. Die Kammlinie des Gebirgszuges der Winterstauden bildet die Nordgrenze des Untersuchungsgebietes; der Schreiberesattel ist die Ostgrenze; die Linie Luguntenkopf, Hälekopf, Seeftulhalpe, Seevorsäß, Exhalder bildet die Südgrenze und im Westen markiert die Bregenzerach eine natürliche Grenze.

### 2.2 Klima

Das Klima im Untersuchungsgebiet ist durch die Staulage am Alpennordrand ausgesprochen niederschlagsreich. In den nahegelegenen Wetterstationen Bizau und Andelsbuch wurden mittlere Jahresniederschläge von 1800 bis 2000 mm gemessen. Die jährliche Niederschlagsverteilung zeigt ein Hauptmaximum im Juli und August und ein Nebenmaximum im Dezember und Januar, während die Monate Februar und März, sowie Oktober und November relativ trocken sind. Die Durchschnittstemperaturen liegen bei 7,3 °C in Andelsbuch und 6,7 °C in Bizau. Januar ist der kälteste Monat, Juli der wärmste (BURMEISTER 1982).

## 3. Bau und Werden der Landschaft

### 3.1 Geologischer Rahmen

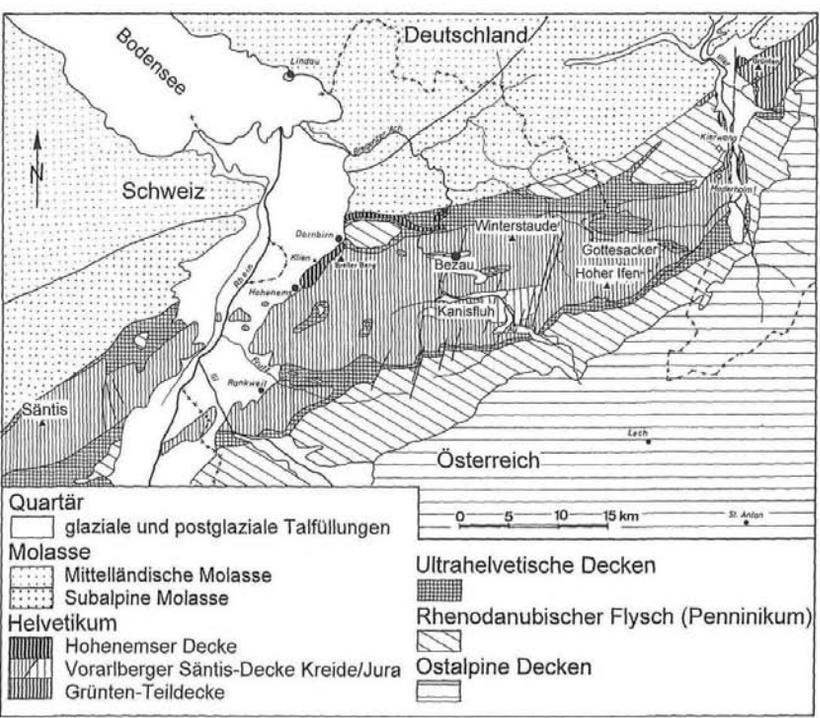
Vorarlberg ist geologisch ein sehr vielfältiger Raum, da dort viele wichtige Baueinheiten der Alpen auf engem Raum nebeneinander anzutreffen sind (Abb. 3). Diese wurden zu unterschiedlichen Zeiten räumlich nebeneinander gebildet und während der Gebirgsbildung von Nord nach Süd als Decken übereinander geschoben (WYSSLING 1986).

Die südlichste Zone, die im Deckengebäude der Alpen am höchsten liegt, ist das Ostalpin. Es besteht zum einen aus kristallinen Gesteinen, also Gneis, Glimmerschiefer und Amphibolit, die in der Silvretta anstehen, zum anderen aus Sedimentgesteinen, überwiegend Kalkstein und Dolomit aus der Triaszeit, die große Teile des Rätikons und Lechquellengebirges aufbauen.

Weiter nördlich und tiefer im Deckenstapel folgt das Penninikum und das Ultrahelvetikum. Dabei handelt es sich überwiegend um Sandsteine, Tonsteine und Mergel aus der Kreidezeit, die auch als Flysch bezeichnet werden und meist grasbewachsene, steile Gipfel formen.

Nördlich schließt die etwa 15 km breite Zone des Helvetikums an. Die größte Teildecke im System der helvetischen Decken ist die Säntis-Decke, die in der Schweiz das Säntisgebiet aufbaut und sich östlich des Rheintals nach Vorarlberg fortsetzt. Der gesamte Gebirgszug der Winterstaude wird von der Vorarlberger Säntis-Decke aufgebaut, ebenso Hoher Ifen und Gottesacker. Die dominierenden Gesteine sind hier Kalksteine und Mergel aus der Kreidezeit. Die Kanisfluh wird dagegen von älteren Gesteinen aus der Jurazeit aufgebaut.

Abb. 3: Geologische Übersichtskarte von Vorarlberg und angrenzenden Gebieten. Der Gebirgszug der Winterstaude wird von Gesteinen der Kreidezeit aufgebaut und gehört zur Säntis-Decke (WYSSLING 1986).



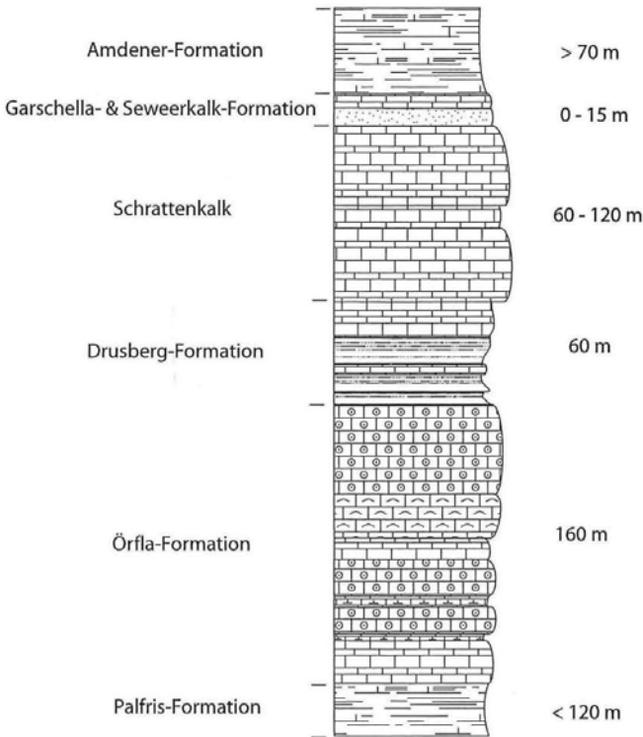
Nördlich des Helvetikums folgt ein weiterer schmaler Streifen aus Flysch. Der Flysch wurde während der Gebirgsbildung als Decke über das Helvetikum geschoben. Später wurde das Helvetikum gehoben und der Flysch weitflächig erodiert.

Der nördlichste Teil von Vorarlberg gehört geologisch zur Molasse-Zone. Hierbei handelt es sich um den Abtragungsschutt der Alpen, der sich im Oligozän und Miozän im Vorlandbecken der Alpen gesammelt hat. Der südliche Teil der Molasse wurde im letzten Stadium der Gebirgsbildung deformiert und in den Deckenbau der Alpen mit einbezogen (SCHOLZ 1995).

### 3.2 Entstehung der Gesteine in der Kreide (Stratigraphie)

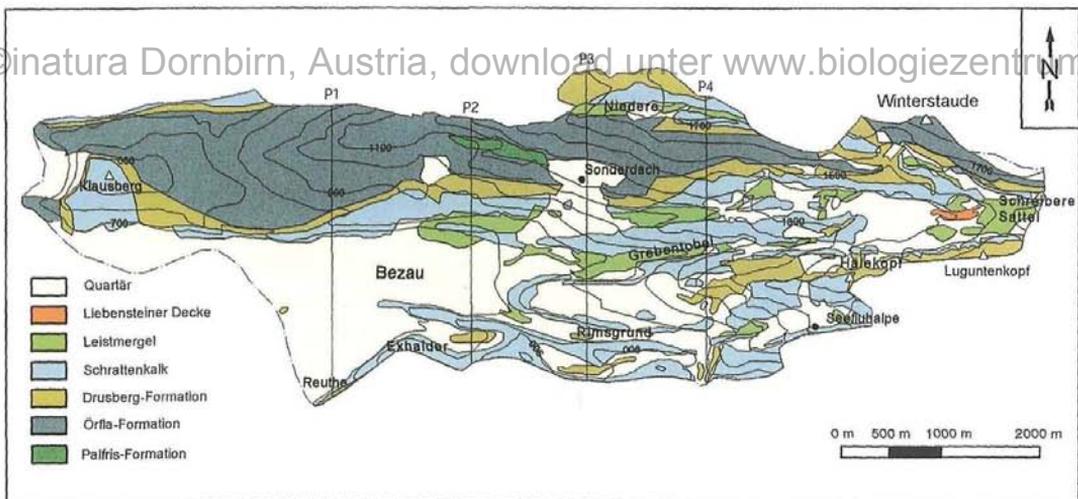
Die Gesteine, die im Gebiet der Winterstaude aufgeschlossen sind, stammen aus der Kreidezeit. Es handelt sich hierbei um Mergel und Kalksteine, vereinzelt auch Sandsteine, die in einem warmen, flachen Meer gebildet wurden (ZACHER 1973, WYSSLING 1986, BOLLINGER 1988, SCHOLZ 1995).

Bei der geologische Kartierung werden im Gelände sogenannte Formationen kartiert, das sind Gesteinseinheiten, die sich eindeutig von den darüber und darunter liegenden Einheiten unterscheiden lassen. Das Alter eines Gesteins lässt sich unter anderem durch radiometrische Methoden und durch Fossilien bestimmen. Ebenso wie man Abschnitten der Menschheitsgeschichte einen Namen gegeben hat („Mittelalter“), tut man dies auch für die Erdgeschichte. So bezeichnet der Begriff „Kreide“ die Zeit zwischen 140 und 65 Millionen Jahren vor heute. Die Kreide wird in zwölf kürzere Zeitabschnitte unterteilt, sogenannte Stufen. Die Stufen der Kreide sind nach Ortschaften in Frankreich und der Schweiz benannt (Berrias, Valangin, Barrême, Hauterive u.a.), weil dort Gesteine aus diesen Stufen besonders typisch anzutreffen sind. Die zeitliche Unterteilung der Erdgeschichte gilt weltweit, Formationen können aber nur regional oder lokal kartiert werden. Im Untersuchungsgebiet wurden folgende Formationen kartiert (Abb. 4):



**Abb. 4:** Normalprofil der Gesteinsformationen im Untersuchungsgebiet.

Die älteste im Gebiet der Winterstaude anstehende Gesteinseinheit ist die Palfris-Formation, die der Stufe des Berrias zugeordnet werde. Die Formation besteht überwiegend aus Mergel und wird daher im Folgenden Palfris-Mergel genannt. Die Formation kann 250-300 m mächtig werden (WYSSLING 1986),



**Abb. 5:** Geologische Karte mit Lage der Profile aus **Abb. 8** (nach NEUKUM 2001 und WERZ 2001).

im Klausbergstollen wurden aber nur 120 m angetroffen (NEUKUM 2001). Die Palfris-Mergel sind nur westlich der Leugeralpe und östlich des Sattels aufgeschlossen (**Abb. 5**).

Der Örfli-Kalk aus dem Berrias bis Valangin ist bis zu 160 m mächtig und besteht aus hellbraunem, grobgebanktem Oolithkalk mit einigen Einschaltungen von Feinsandstein und Kalk-Mergel Wechsellagerungen. Der Örfli-Kalk baut nahezu den gesamten Höhenzug vom Klausberg bis zur Winterstaude auf (**Abb. 6**). Die Gemsmättli-Schicht repräsentiert zwar einen langen Zeitabschnitt, ist aber weniger als 1 m mächtig und nur lückenhaft vorhanden; sie wurde daher nicht getrennt kartiert. Der Kieselkalk (Hauterive), der in weiten Teilen Vorarlbergs vorhanden ist, wurde im Winterstaude-Gebiet nie abgelagert, da das Gebiet zur dieser Zeit eine Insel war – Kalkstein bildet sich aber nur unter Meeresbedeckung (WYSSLING 1986).

Die Drusberg-Mergel aus der Zeit des Barrême bestehen überwiegend aus einer Wechsellagerung von Megeln mit eingeschalteten Kalkbänken. Im Winterstaude-Gebiet beträgt die Mächtigkeit nur etwa 60 m – bedeutend weniger, als im angrenzenden Gottesackergebiet.

Die Drusberg-Mergel gehen mehr oder weniger scharf in den Schratenkalk über, der sich im Barrême und Apt gebildet hat. Der Schratenkalk, auch Urgonkalk genannt, ist ein etwa 100 m mächtiger, sehr reiner Kalkstein, der überwiegend aus den Trümmern von Fossilien besteht (BOLLINGER 1988, SCHOLZ 1995, ZACHER 1973). Der Schratenkalk bildet im Gelände häufig markante Gipfel und Felswände: die Nordabstürze des Hälekopf und Luguntenkopf, die Felswände um Rimsgrund und die Steilabrische des Exhalder. Weiter östlich baut der Schratenkalk den Gottesacker und die markante Gipfelplatte des Hohen Ifen auf.

Die Garschella-Formation (Apt-Cenoman) ist innerhalb des Vorarlberger Helvetikums sehr variabel ausgebildet. SCHWERD (1996) gibt eine Mächtigkeit von wenigen Dezimetern bis zu 70 m an. Im Untersuchungsgebiet besteht die Formation überwiegend aus Glaukonitsandstein, der aber nur lückenhaft vorhan-



den ist und maximal 6 m mächtig wird (NEUKUM 2001, WERZ 2001). An der Basis und im oberen Teil der Formation kommen Horizonte mit Phosphoritknollen und phosphorisierten Ammoniten vor. Die Kirche von Reuthe steht auf einem bekannten Aufschluss der Garschella-Formation (OBERHAUSER 1995).

Der Seewer Kalk (Alb-Cenoman) ist ein dickbankiger Kalkstein, der einzelne Linsen von Glaukonitsandstein enthalten kann (FÖLLMI 1986). Die Formation ist im Gebiet nur lückenhaft verbreitet und wenige Meter mächtig (NEUKUM 2001, WERZ 2001).

Die Amdener Mergel (Santon-Campan), auch als Leistmergel bezeichnet, bestehen aus sandigen und tonigen Mergeln, die häufig eine charakteristische Schieferung zeigen. Die Formation kann eine Mächtigkeit von bis zu 400 m erreichen (FÖLLMI 1986); im Gebiet ist sie mindestens 70 m mächtig. Die Amdener Mergel sind in schmalen Streifen entlang der Täler (Wildmoosbach, Greben-tobel, Rimsgrund) erhalten, sowie im Gebiet zwischen Stonger Moos und Schreiberesattel. Dort befindet sich auch ein isoliertes Vorkommen von Mergeln, die nicht Teil der Vorarlberger Säntis-Decke sind. Es handelt sich hierbei um eine tektonische Klippe der Ultrahelvetischen Decken.

### 3.3 Entstehung der geologischen Strukturen im Tertiär (Tektonik)

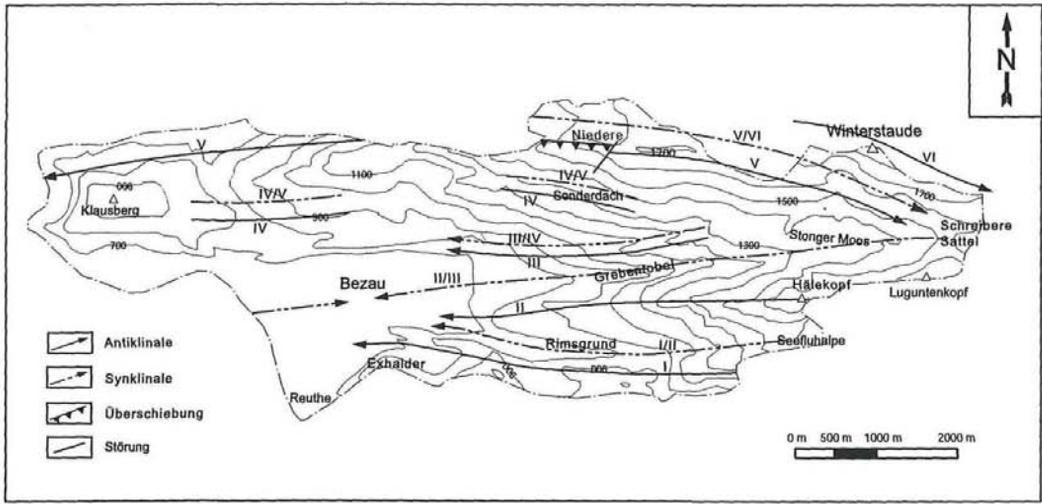
Die Gesteine im Untersuchungsgebiet wurden zwar bereits in der Kreidezeit vor 140 bis 65 Millionen Jahren abgelagert. Die geologischen Strukturen – Falten und Störungen – sind aber später entstanden. Im Ablagerungsraum des Helvetikums begann die Einengung und Verformung der Gesteinsschichten im Tertiär (genauer gesagt im Oligozän und Miozän) vor etwa 25 Millionen Jahren (EISBACHER 1996). Dadurch wurden die ehemals horizontalen Schichten gefaltet, an Störungsflächen übereinander geschoben und gegeneinander versetzt.

**Abb. 6:** Felswand aus dem Oolithkalk der Örflla-Formation östlich der Rühe-Alpe; von hier ist in historischer Zeit ein Felssturz abgegangen.

Im Winterstaude-Gebiet verlaufen die Falten meist in Ost-West-Richtung. Dabei tauchen die Faltenachsen im Untersuchungsgebiet mit durchschnittlich etwa 8° nach Osten ab (NEUKUM 2001). Im Großen und Ganzen stimmt die Topographie mit dem Faltenbau überein: Antiklinalen (Faltensättel) bilden Berg-rücken und Synklinalen (Faltenmulden) bilden Täler. Die Topographie ist aber meist ausgeglichener als die geologischen Strukturen, so dass die Schichten meist steiler als der Hang einfallen.

Die meisten Falten sind in ihrer Längserstreckung nicht kontinuierlich: Sie laufen aus, enden an Störungen, spalten sich in kleinere Falten auf, vereinigen sich mit benachbarten Falten, oder werden durch andere Strukturen ersetzt. NEUKUM (2001) hat den Faltenbau des Gebietes sehr detailliert kartiert und beschrieben. Einige dieser Falten sind aber keine eigenständigen Strukturen, so dass hier eine vereinfachte Darstellung gewählt wird. Die Antiklinalen werden von Süd nach Nord mit römischen Ziffern bezeichnet, die Synklinalen werden durch Kombination der Ziffern der angrenzenden Antiklinalen benannt (Abb. 7, 8).

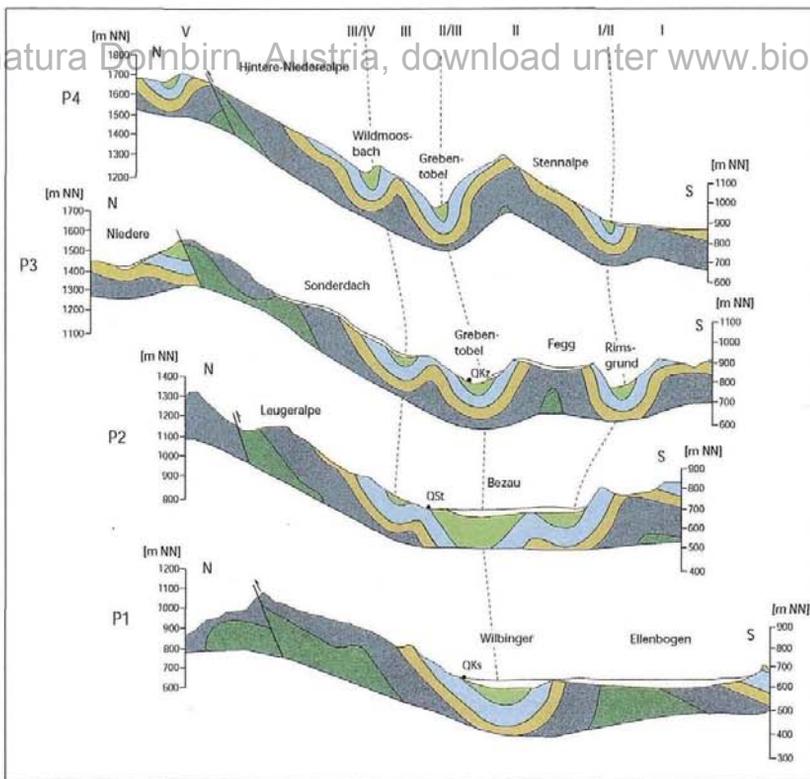
Abb. 7: Tektonische Karte mit Darstellung der Antiklinalen (Faltensättel) und Synklinalen (Faltenmulden).



Die Winterstaude-Antiklinale VI verläuft in Richtung WNW-ESE und taucht dabei nach ESE ab. Sie besteht aus Öfla-Kalk und baut den Gipfel der Winterstaude auf. Die südlich angrenzende Synklinale V/VI ist eine sehr kleine und diskontinuierliche Struktur.

Die Klausberg-Niedere-Antiklinale V ist die Hauptantiklinale des Gebietes. Sie verläuft zunächst in West-Ost-Richtung und baut den gesamten Berggrücken vom Klausberg bis zur Hinteren Niedere auf. Dort biegt die Faltenachse nach ESE ab und läuft im Bereich des Schreiberessattels aus. In ihrem mittleren Abschnitt wird die Antiklinale in ihrem Kern von einer Überschiebung versetzt. Die südlich angrenzende Synklinale IV/V und Antiklinale IV sind nicht sehr ausgeprägt und in ihrer Längserstreckung nicht kontinuierlich. Sie können daher als untergeordnete Faltenstrukturen auf dem Südschenkel der Klausberg-Niedere-Antiklinale angesehen werden. Das Faltenpaar ist anhand der Topographie kaum zu erkennen. Im Kern der Antiklinale IV stehen lokal die Palfris-Mergel an.

Abb. 8: Geologische Profile (Neukum 2001 und Werz 2001). Lage der Profile und Legende siehe Abb. 5.



Die Wildmoos-Synklinale III/IV ist nur im Ostteil des Untersuchungsgebietes zu erkennen. Vom Gebiet der Wildmoos-Alpe taucht sie sanft nach Westen ab und bildet dabei das Tal des Wildmoosbachs (auch Wobelsbach genannt). Entlang der Tiefenlinie der Synklinale sind die Amdener Mergel erhalten. Nach Westen läuft die Antiklinale auf der Höhe von Oberbezzau aus; nach Osten spaltet sie sich in kleinere Faltenstrukturen auf (NEUKUM 2001). Die südlich angrenzende Rumplatt-Antiklinale III bildet einen niedrigen Rücken aus Schrattekalk zwischen Wildmoosbach und Grebentobel.

Die Grebentobel-Synklinale II/III ist die Hauptsynklinale des Gebietes. Der Schreiber Sattel an der Ostgrenze des Untersuchungsgebietes ist die Kulmination der Faltenachse. Von dort taucht die Synklinale mit etwa  $8-10^\circ$  nach Westen unter den Talraum von Bezzau ab, erreicht dort eine lokale Depression, um weiter westlich unter der Bregenzerach wieder leicht anzusteigen. In Ihrem oberen Abschnitt bildet die Synklinale das Stonger Moos und das Grebentobel. Entlang der Tiefenlinie der Synklinale wird der Schrattekalk meist von Amdener Mergeln bedeckt.

Die Luguntenkopf-Antiklinale II bildet den Bergrücken vom Luguntenkopf über den Hälekopf bis nach Fegg. Sie taucht in dieser Richtung zunehmend steil unter den Talraum von Bezzau ab. Entlang des Scheitels der Antiklinale ist der Schrattekalk aufgebrochen, so dass die Drusberg-Mergel und sogar der Örfalkalk freigelegt wurden, allerdings meist von Moräne bedeckt. Die Rimsgrund-Synklinale I/II erstreckt sich von der Seefluhalpe über Rimsgrund bis nach Bezzau.

Entlang ihrer Tiefenlinie sind Amdener Mergel vorhanden. Sowohl die Antiklinale, als auch die Synklinale laufen unter dem Talraum von Bezau vermutlich aus und vereinigen sich mit der südlich angrenzenden Exhalder-Antiklinale I. Diese Antiklinale bildet den gleichnamigen Bergrücken am Südrand des Gebietes, der überwiegend von Schraffenkalk aufgebaut wird.

Generell vereinfacht sich der Faltenbau in Richtung Westen. Während im östlichen und zentralen Teil des Gebietes sechs Antiklinalen und fünf Synklinalen nebeneinander liegen, gibt es am Westrand des Gebietes vermutlich nur zwei Antiklinalen und eine Synklinale: Die Antiklinale V bildet den Klausberg, die Synklinale II/III ist unter dem Talboden von Bezau verborgen und die Antiklinale I bildet den Exhalder, bevor sie ebenfalls unter dem Talraum verschwindet.

Durch die Einengung der Schichten während der Gebirgsbildung sind neben den Falten auch Störungen und Klüfte entstanden. Störungen sind Bruchflächen, an denen benachbarte Gesteinskörper gegeneinander versetzt wurden; an Klüften hat dagegen keine Bewegung stattgefunden. Man unterscheidet drei Arten von Störungen: Bei Blattverschiebungen ist die Bruchfläche vertikal und benachbarte Gesteinskörper wurden (oder werden) horizontal aneinander vorbei bewegt. Bei Abschiebungen ist die Störungsfläche geneigt und der obere Gesteinskörper gleitet auf dem unteren ab, dabei bewegen sich die beiden Gesteinskörper voneinander weg. Bei Über- bzw. Aufschiebungen wird der obere Gesteinskörper dagegen auf den unteren aufgeschoben, dabei bewegen sich die Gesteinskörper aufeinander zu (EISBACHER 1996).

Im Winterstaude-Gebiet gibt es Blattverschiebungen und Überschiebungen (Abb. 9). Die wichtigste Überschiebung verläuft parallel zur Klausberg-Niedere-Antiklinale und schiebt den Südschenkel der Falte auf deren Nordschenkel. Eine bedeutende Blattverschiebung ist die Ostergunten-Störungszone, die das gesamte Vorarlberger Helvetikum in SSW-NNE-Richtung durchzieht und unter anderem das Winterstaude-Gebiet von Hochifen und Gottesacker trennt (OBERHAUSER 1951). Da sich der Faltenbau auf beiden Seiten der Störung unterscheidet, muss sie gleichzeitig mit der Faltung entstanden sein. Im eigentlichen Untersuchungsgebiet gibt es zahlreiche kleinere Blattverschiebungen, die etwa SW-NE verlaufen und oft einen Versatz von 40-70 m aufweisen. Eine weitere Schar von Störungen verläuft SE-NW. Nahezu in jedem Aufschluss ist die intensive Klüftung der Gesteine zu beobachten; die Klüfte sind oft mit Calcit-Kristallen verfüllt. Die wichtigsten Kluftrichtungen sind S-N, SE-NW und SW-NE (NEUKUM 2001, WERZ 2001).

### 3.4 Formung der Landschaft im Quartär

Wir haben nun gesehen, dass die Gesteinsschichten in der Kreidezeit gebildet wurden und die geologischen Strukturen im Tertiär entstanden. Die Gestaltung der Landschaft ist allerdings wesentlich jünger und dauert bis heute an. Die Hebung des Gebietes – und damit die Entstehung des Gebirges im morphologischen Sinn – ereignete sich im Oligozän, Miozän und verstärkt im Pliozän. Erst dadurch konnten die überlagernden Flyschdecken abgetragen und die Gesteine des Helvetikums nach und nach durch Erosion freigelegt werden.



Das heutige Relief entstand erst im Quartär, das vor 1,8 Millionen Jahren begann. Durch die mehrfache Vergletscherung wurden tiefe und weite Täler ausgeräumt, wie der Talraum von Bezau. Die Teile des Gebirges, die das Eisstromnetz überragten, wurden durch Frostsprengung geformt. So entstanden steile Hänge, schmale Grate und scharfe Gipfel. Ablagerungen aus dem Quartär, also aus dem Eiszeitalter (Pleistozän) und der Nacheiszeit (Holozän), sind überall im Gebiet zu finden: Von Gletschern abgelagerte Moränen sind bei Fegg und im Stonger Moos vorhanden. Am Ausgang des Rimsgrund befinden sich Eisrandablagerungen. Der gesamte Bezauer Talraum ist mit Quartären Sedimenten verfüllt. Hangschutt ist weit verbreitet. Auch die zahlreichen Feuchtgebiete und Moore sind im Holozän entstanden. Zu den jüngsten Ablagerungen gehören historisch überlieferte Felsstürze bei Sonderdach und östlich der Rühle-Alpe (Abb. 5) (SEIJMONSBERGEN & VAN WESTEN 1987, OBERHAUSER 1995, WERZ 2001, NEUKUM 2001).

**Abb. 9: Störungen (Blattverschiebungen mit Überschiebungskomponente) im Schratzenkalk oberhalb der Grebentobelquelle. Auf der Störungsfläche rechts im Bild ist Harnischstriemung zu erkennen, welche die Bewegungsrichtung der benachbarten Gesteinsblöcke anzeigt.**

#### 4. Grundwasser, Quellen und Gewässernetz

##### 4.1 Hydrogeologische Eigenschaften der Gesteine

###### *Allgemeines*

Eine geologische Formation, die Grundwasser speichern und weiterleiten kann, wird als Grundwasserleiter bezeichnet. Dabei werden drei Typen unterschieden: Porengrundwasserleiter bestehen aus Sand und Kies, wobei die Poren zwischen den Körnern mit Grundwasser erfüllt sein können. Kluftgrundwasserleiter sind

Festgesteine wie Sandstein oder Basalt, in denen das Wasser durch Klüfte und Spalten fließen kann. Ein Karstgrundwasserleiter bildet sich durch die korrosive Erweiterung von Klüften und anderen Trennflächen in Kalkstein oder anderen verkarstungsfähigen Gesteinen. So entsteht ein hierarchisch organisiertes Netzwerk von Spalten, Röhren und Höhlen, durch die das Grundwasser sehr rasch über weite Distanzen fließen kann. Karstgrundwasserleiter sind daher durch rasche hydraulische Reaktionen auf hydrologische Ereignisse (Niederschlag, Schneeschmelze) charakterisiert (HÖTZL 1996).

Geologische Formationen, die nur sehr gering durchlässig sind und daher kein Grundwasser speichern und weiterleiten können, werden als Grundwasserstauer bezeichnet (korrekt: Grundwassernichtleiter oder -geringleiter). Wichtige Vertreter sind Ton, Tonschiefer, Glimmerschiefer und Mergel.

#### *Karstgrundwasserleiter und Grundwasserstauer im Gebiet der Winterstaude*

Im Winterstaude-Gebiet gibt es zwei verkarstete Kalkstein-Formationen. Diese werden von Grundwasserstauern aus Mergel unterlagert, voneinander getrennt und lokal auch überlagert. Im Folgenden werden für diese Mergel-Formationen daher die Begriffe Liegendstauer, Zwischenstauer und Hangendstauer verwendet.

Die Palfris-Mergel bilden den Liegendstauer unter dem Örfli-Kalk und zugleich die definitive Verkarstungsbasis des gesamten Karstsystems.

Der Örfli-Kalk ist ein unreiner, intensiv geklüfteter Kalkstein. Die Klüfte sind oft durch Kalklösung auf einige Zentimeter erweitert. Im Gelände sind wenige Karstformen zu erkennen: Nur drei Dolinen, zwei kleine Schächte, einige offene Spalten und schwach ausgeprägte Karren wurden im Gebiet beschrieben (WERZ 2001, NEUKUM 2001). Höhlen sind im Örfli-Kalk nicht bekannt. Der Örfli-Kalk bildet also einen nur mäßig stark entwickelten Karstgrundwasserleiter. Obwohl die Hänge oft sehr steil sind (30-40°) und trotz der hohen Niederschläge, findet kaum Oberflächenabfluss statt.

Die Drusberg-Mergel enthalten zwar einige Kalkbänke, die sogar verkarstet sein können, wirken aber insgesamt als Wasserstauer zwischen dem unter- und dem überlagernden Karstgrundwasserleiter. Die Formation ist nur 60 m mächtig. Dies liegt in der selben Größenordnung, wie die Versatzbeträge der Querstörungen. Hydraulischer Kontakt zwischen den beiden Karstgrundwasserleitern ist also entlang der Störungen möglich.

Der Schrattenkalk bildet einen voll entwickelten Karstgrundwasserleiter, der durch hohe unterirdische Fließgeschwindigkeiten und rasche hydraulische Reaktion auf hydrologische Ereignisse charakterisiert ist, wie Untersuchungen im angrenzenden Gottesackergebiet gezeigt haben (GOLDSCHIEDER & HÖTZL 2000). Im Gegensatz zum Gottesacker sind im Winterstaude-Gebiet nur wenige Höhlen im Schrattenkalk entwickelt. Die Brühlgrotte bei Andelsbuch ist die bekannteste davon. Der Schrattenkalk wird oft von flachen Rendzina-Böden bedeckt und ist meist bewaldet. Karren (Abb. 11) und Dolinen (Abb. 10) sind außerordentlich zahlreich. Auf Schrattenkalk gibt es keinen Oberflächenabfluss. Bäche, die aus angrenzenden Bereichen zufließen, versinken oft über Schlucklöcher im Schrattenkalk, beispielsweise am Westende des Stonger Mooses (Abb. 14).



**Abb. 10:** Dolinen im Schraffenkalk zwischen Hasenstrick und Stongerhöhenalpe. Herr Fritz RUF (siehe Danksagung) als Größenvergleich.



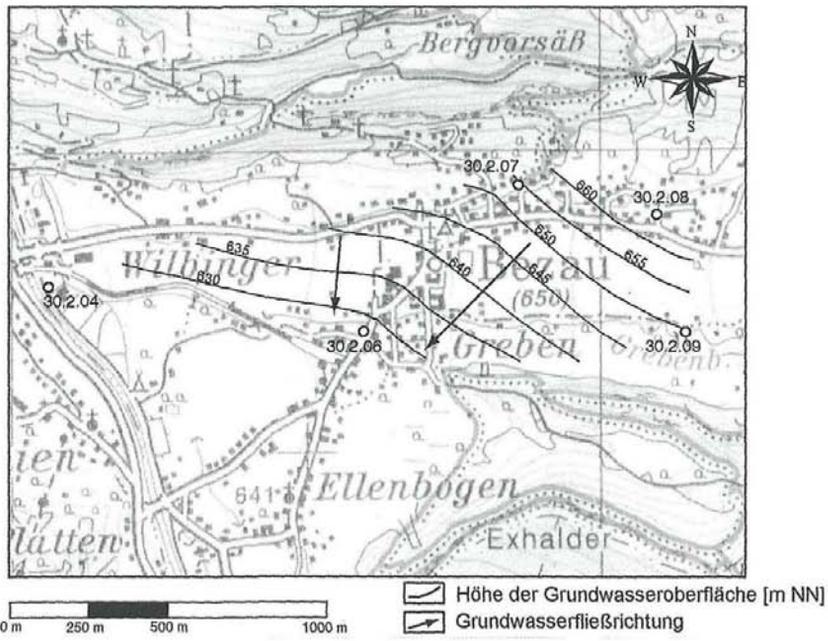
**Abb. 11:** Karren auf Schraffenkalk im Gebiet zwischen Stennalpe und Seefluhalpe. Selbst bei Starkregen versickert hier alles Wasser im Untergrund.

Sowohl die Garschella-Formation, als auch der Seewer Kalk sind geringmächtig und nur lückenhaft verbreitet. Sie spielen daher hydrogeologisch keine Rolle. Die mächtigen Amdener-Mergel sind dagegen sehr gering durchlässig und bilden entsprechend den Hangendstauer über dem Schratzenkalk-Karstgrundwasserleiter. Gebiete mit anstehendem Amdener-Mergel zeigen immer ein oberflächliches Gewässernetz.

*Der Porengrundwasserleiter im Bezauer Talraum*

Die Ablagerungen im Talraum von Bezau bilden den einzigen bedeutenden Porengrundwasserleiter des Gebietes. Sie bestehen aus Sand und Kies und enthalten einige Zwischenlagen aus schluffigem Sand. Der Grundwasserspiegel liegt meist wenige Meter, lokal aber bis zu 22 m unter der Geländeoberfläche. Die Grundwassergleichen zeigen eine Fließrichtung nach Südwesten an. Dies deutet umgekehrt auf einen bedeutenden Zustrom von Nordosten, also aus dem alpinen Karstsystem (Abb. 12). Daneben gibt es einige kleine Grundwasservorkommen in Hangschutt, Bergsturzmaterial und in sonstigen quartären Ablagerungen.

Abb. 12: Die Grundwassergleichen im Porengrundwasserleiter des Bezauer Talraumes zeigen eine Fließrichtung nach Südwesten an. Dies belegt einen Zustrom von Nordosten, also aus dem Karstsystem (NEUKUM 2001).

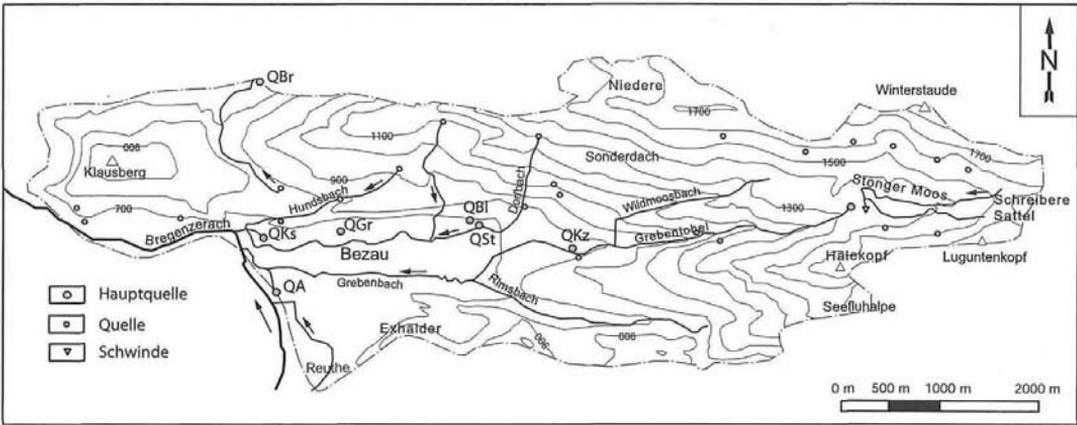


4.2 Quellen und Gewässernetz

*Überblick*

Die hydrogeologischen Eigenschaften der Gesteine spiegeln sich in den Quellen und im Gewässernetz wieder. Umgekehrt kann man aus den Quellen und dem Gewässernetz auf die Gesteinseigenschaften schließen. In den wasserstauenden Mergeln gibt es (fast) kein Grundwasser. Daher treten dort auch keine bedeutenden Quellen aus. Stattdessen gibt es dort oberflächlichen Abfluss. Viele

Bäche folgen den Synklinalen (Faltenmulden), weil dort häufig Amdener Mergel anstehen. Die verkarsteten Kalksteine können dagegen Wasser aufnehmen und weiterleiten. Daher gibt es dort kaum oberflächlichen Abfluss; seitlich zufließende Bäche versinken und versickern sogar häufig im Untergrund. In tieferen Lagen, meist am Fuß des Gebirgszuges, treten einige große Quellen aus dem verkarsteten Kalkstein aus. Zahlreiche kleinere Quellen entspringen aus Hangschutt und ähnlichen Ablagerungen. Die Bregenzerach ist der Vorfluter des gesamten Untersuchungsgebiets und damit auch des Karstsystems. Der Bregenzerach fließen von Osten her zwei Bäche aus dem Untersuchungsgebiet zu, der Grebenbach und der Dorfbach (Abb. 13).



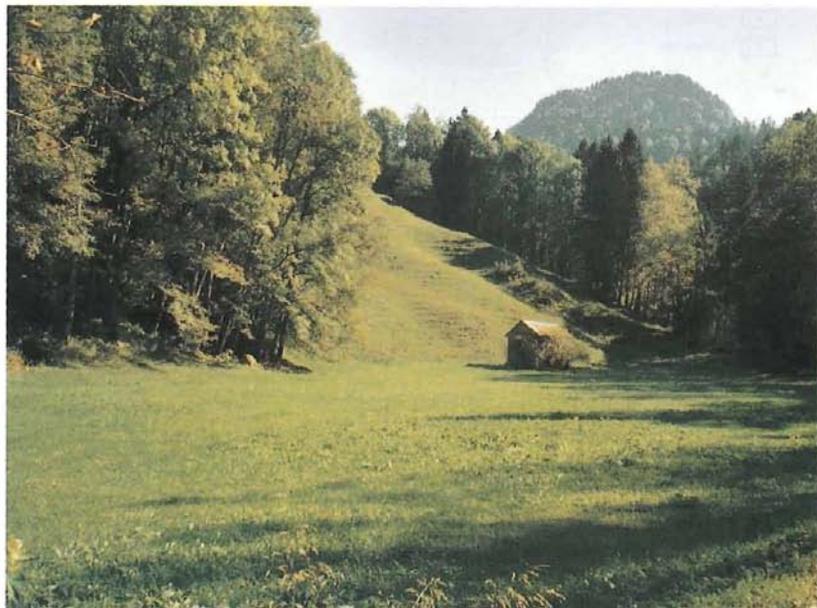
**Abb. 13: Quellen und Gewässernetz im Untersuchungsgebiet; Erläuterung der Kürzel im Text.**

#### *Grebenbach und Kreuzbodenquelle (QKz)*

Wo der Grebenbach beginnt, lässt sich nicht eindeutig sagen. Unterhalb des Schreiberesattel und rund um das Stonger Moos entspringen zahlreiche kleine Quellen, die zunächst den Schreibererbach speisen. Dieser versinkt am westlichen Ende des Stonger Moores über eine oder mehrere Schwinden im verkarsteten Schratenkalk (Abb. 14). Bei Hochwasser kann der Bach aber über die Schwinden hinweg fließen und direkt in den Grebenbach gelangen (WERZ 2001). Dieser entspringt 200 m westlich unterhalb der Schwinden aus Spalten im Schratenkalk. Diese Quelle ist der Beginn des Grebenbobl, der die Tiefenlinie der gleichnamigen Synklinale II/III nachzeichnet. Der Bach fließt abwechselnd auf Schratenkalk, Amdener-Mergel und Bachschottern. Bei Niedrigwasser fällt er abschnittsweise trocken. Bei Hochwasser erhält er einen bedeutenden Zufluss vom Wildmoosbach (Wobelsbach), also aus der Synklinale III/IV. Da der Wildmoosbach streckenweise über Schratenkalk fließt, versickert er häufig.



**Abb. 14:** Blick von der Sammerealpe nach Südwesten auf das Stonger Moos und den Schreiberebach, der nahe des rechten Bildrands im Bereich des Wäldchens über Schlucklöcher im Schrattenkalk versinkt. Dahinter beginnt das Grebentobel. Die Nordabstürze des angrenzenden Bergrückens werden von Schrattenkalk (hellgraue Felswände) und Drusbergschichten (bräunliche Steilhänge) aufgebaut.



**Abb. 15:** Fassungsbe-  
reich der Kreuzboden-  
quelle. Unter der  
Wiese sind in 2 m  
Tiefe die Sickerstränge  
verlegt.

Die Kreuzbodenquelle (QKz) liegt auf 770 m Höhe am Ausgang des Grebentobels auf der rechten, nördlichen Seite des Grebenbachs. Sie ist die wichtigste Trinkwasserquelle Bezaus. Außer einer betonierten Quellstube ist allerdings nichts zu sehen. Unter der östlich anschließenden Wiese sind in zwei Meter Tiefe drei Sickerstränge verlegt, über die Grundwasser aus Kiesablagerungen gewonnen und der Quellstube zugeleitet wird (Abb. 15). In der Umgebung der

Wiese stehen Amdener-Mergel an. Das Grundwasser kann durch vier denkbare Mechanismen gebildet werden: 1. Zufluss aus dem Grebenbach, 2. direkte Infiltration von Niederschlägen, 3. Zufluss von Hangwasser, 4. Aufstieg von Karstwasser aus dem Schrattekalk über eine Störung (Abb. 16). Die Schüttung der Quelle liegt meist zwischen 2 und 20 l/s, in langen Trockenzeiten kann sie jedoch fast versiegen.

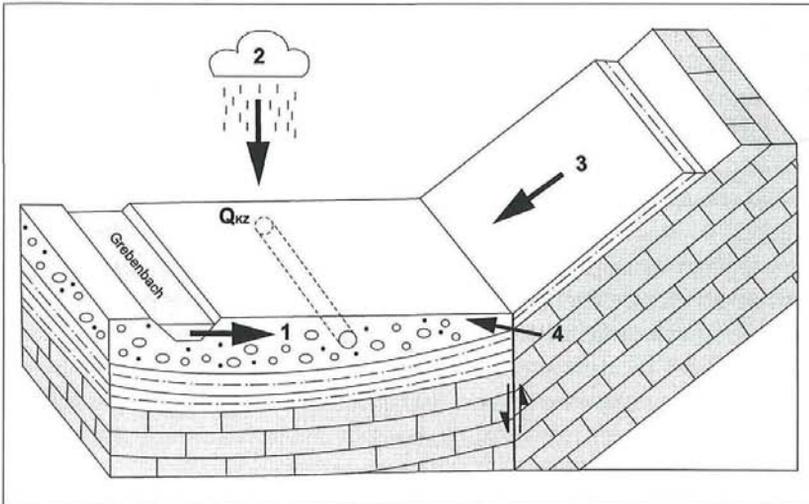


Abb. 16: Vier mögliche Mechanismen der Grundwasserneubildung im Bereich der Kreuzbodenquelle; Erläuterung im Text (WERZ 2001).

Auch auf seinem Fließweg über den Talraum von Bezau verliert der Grebenbach einen Teil seines Wassers durch Versickerung. Am östlichen Ende des Talraumes vereinigt er sich mit dem Rimsbach, der aus der Rimsgrund-Synklinale I/II zufließt. Kurz vor seiner Einmündung in die Bregenzerach erhält er einen weiteren Zufluss von der Quelle an der Ach (s. u.).

#### Dorfbach, Stuolequelle (QSt) und benachbarte Quellen

Das zweite wichtige Fließgewässer ist der Dorfbach, der von zahlreichen Zuflüssen vom Berghang nördlich von Bezau und vom Felssturzgelände unterhalb von Sonderdach gespeist wird. Den größten Zufluss erhält der Dorfbach von zwei benachbarten Quellen am Hangfuß in 690 m Höhe: von der Stuolequelle (QSt) und der Bleilequelle (QBl). Die Stuolequelle wird zur Trinkwasserversorgung von Bezau genutzt, wenn die Kreuzbodenquelle zu wenig Wasser liefert. Sie schüttet etwa 10 bis 100 l/s und entspringt direkt aus Karstspalten im Schrattekalk im Bereich der Rumplatt-Antiklinale III. Unterhalb der Quelle taucht der Schrattekalk unter die wasserstauenden Amdener Mergel ab.

Etwa 15 m östlich der Stuolequelle befindet sich eine weitere Karstquelle, die bis zu 180 l/s schütten kann, in trockenen Zeiten aber rasch versiegt. Die Quelle im Julialoch befindet sich etwa 150 m westlich der Stuolequelle und tritt mit einigen Sekundenlitern direkt aus einer korrosiv erweiterten Kluft im Schrattekalk aus. Hinsichtlich ihrer topographischen und hydrogeologischen Position und ihrer physikalischen, chemischen und bakteriologischen Beschaffenheit stel-

len die vier beschriebenen Quellen eine Einheit dar und werden daher auch als Quellgruppe um die Stuoquelle bezeichnet.

#### *Quelle unter dem Grütt (QGr), Kressbachquelle (QKs) und Hundsbach*

Westlich der Stuoquelle entspringen am Südfuß des Gebirgszuges der Winterstaude einige weitere wichtige Quellen (NEUKUM 2001). Die Quelle unter dem Grütt (QGr) auf 635 m Höhe schüttet mehrere Liter pro Sekunde und fördert vermutlich eine Mischung aus Karstwasser und Wasser aus den Talkiesen.

Die größte und wichtigste Quelle in diesem Bereich ist die Kressbachquelle (QKs) auf 620 m Höhe. Sie entspringt am äußersten Nordrand des ebenen Talbodens, direkt unterhalb einer Felswand aus Schrattenkalk. Es ist daher nicht ohne weiteres zu erkennen, ob die Quelle ihr Wasser aus dem Porengrundwasserleiter im Talraum, oder aus dem alpinen Karstgrundwasserleiter erhält. Die Kressbachquelle besteht aus mehreren Austritten, die zusammen etwa zwischen 30 und 300 l/s schütten. Aufgrund der ausreichenden Menge und der guten Qualität ihres Wassers ist sie für die Trinkwasserversorgung interessant. Bisher wird sie jedoch nicht genutzt.

Der recht unbedeutende Hundsbach entspringt bei Bergvorsäß und folgt einem kleinen Tal, das einen schmalen Streifen von Drusberg-Mergeln nachzeichnet. Abschnittsweise fließt der Bach jedoch über die beiden angrenzenden Kalkstein-Formationen, wo er häufig versickert und trockenfällt. Knapp westlich der Kressbachquelle mündet er in den Dorfbach.

#### *Quelle an der Ach (QA)*

Am Westrand des Bezauer Talraums, nahe des rechten, östlichen Ufers der Bregenzerach entspringt auf 617 m Höhe eine Quelle, die etwa 40 bis 500 l/s schüttet (NEUKUM 2001). Auch wenn das Wasser aus Kies und Steinen austritt, legen geologische Überlegungen nahe, dass in wenigen Metern Tiefe Schrattenkalk vorhanden ist. Tektonisch gehört dieser Schrattenkalk zum Südschenkel der Grebentobel-Synklinale. Es erscheint daher möglich, dass die Quelle an der Ach (QA) mit dem alpinen Karstsystem in Verbindung steht.

#### *Sonstige Quellen*

Eine weitere wichtige Quelle ist die Brühlgrotte in Andelsbuch, also auf der Nordseite des Gebirgszuges der Winterstaude. Die Brühlgrotte ist ein 150 m langes Höhlensystem im Schrattenkalk. Die Quellschüttung variiert zwischen wenigen Litern bis zu mehreren hundert Litern pro Sekunde. Bei früheren Markierungsversuchen im Bereich der Vorderen Niedere wurde eine Verbindung zur Brühlgrotte festgestellt (BURMEISTER 1980). Es ist zwar unwahrscheinlich, aber dennoch denkbar, dass die Quelle auch Zuflüsse von der Südseite des Gebirgszuges erhält. Neben den hier aufgeführten Quellen, gibt es noch zahlreiche kleinere Wasseraustritte, die ausführlich von NEUKUM (2001) und WERZ (2001) beschrieben werden.

## 5. Temperatur, Inhaltsstoffe und Qualität der Quellwässer

### 5.1 Überblick

In Österreich gilt die Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (BGBl 1998), im Folgenden kurz *Trinkwasserverordnung* genannt. Danach muss das Trinkwasser geeignet sein, ohne Gefährdung der menschlichen Gesundheit getrunken oder verwendet zu werden. Hierfür werden klare Kriterien in Form von Grenzwerten und Richtzahlen angegeben. Trinkwasser gilt als das am strengsten kontrollierte Lebensmittel mit den höchsten Qualitätsstandards.

Im Zeitraum vom 15. bis 20. August 2000 wurden bei mittleren Abflüssen alle Quellen des Gebietes, sowie ausgewählte Bäche, Versickerungen und Bachschwinden nach den Anforderungen der Trinkwasserverordnung beprobt, untersucht und bewertet (insgesamt 50 Probenahmestellen). Die Wassertemperatur und andere Kennwerte der Quellwässer wurden vor Ort gemessen. Zusätzlich wurden Wasserproben entnommen und im Umweltinstitut Vorarlberg hydrochemisch und bakteriologisch untersucht. Ausgewählte Quellen wurden vom Umweltinstitut schon vor Projektbeginn regelmäßig untersucht. Die vollständigen Ergebnisse werden von NEUKUM (2001) beschrieben. Hier wird nur ein kurzer Überblick gegeben.

### 5.2 Wassertemperatur und physiko-chemische Kennwerte

Aus der Wassertemperatur einer Quelle lassen sich Rückschlüsse auf die Herkunft des Wassers ziehen. Die Temperatur einer Quelle, die aus einem tiefgründigen Vorkommen gespeist wird, entspricht ziemlich genau der mittleren jährlichen Lufttemperatur des Ortes und zeigt dabei kaum tages- und jahreszeitliche Schwankungen (MATTHEB 1994). Abweichungen und Schwankungen der Wassertemperatur deuten dagegen auf flachgründiges Grundwasser oder auf den Zufluss von Oberflächenwasser. Da im Gebirge die Lufttemperatur mit der Höhe abnimmt, liefert die Wassertemperatur auch Informationen über die Höhenlage des Einzugsgebietes. Liegt die Wassertemperatur über der mittleren jährlichen Lufttemperatur, so gilt die Quelle als „zu warm“, im umgekehrten Fall ist sie „zu kalt“ (GOLDSCHEIDER 1998).

Im Untersuchungsgebiet liegt die mittlere Jahrestemperatur auf der Höhe von Bezau (650 m) bei 7,0 °C und nimmt um etwa 0,6 °C pro 100 m ab (*Abb. 17*).

An der Stuoquelle (QSt) und den benachbarten Karstquellen wurden zwischen Februar und August 2000 relativ konstante Wassertemperaturen von 7,0 bis 7,5 °C gemessen (*Abb. 18*), also nur wenig mehr als die mittlere jährliche Lufttemperatur der entsprechenden Höhenlage (6,8 °C). Diese Befunde deuten auf ein relativ großes und tiefgründiges Grundwasservorkommen und auf geringen Einfluss von Oberflächenwasser.

Abb. 17: Höhenlage und Temperatur aller Quellen des Untersuchungsgebietes im August 2000. Die Linie zeigt die Abnahme der mittleren jährlichen Lufttemperatur mit der Höhe (aus Daten der Wetterstationen Bizau und Andelsbuch). Die Temperaturen aller Quellen liegen aufgrund der sommerlichen Erwärmung oberhalb dieser Linie. Wichtige Quellen mit Kürzel, Erläuterungen im Text (NEUKUM 2001).

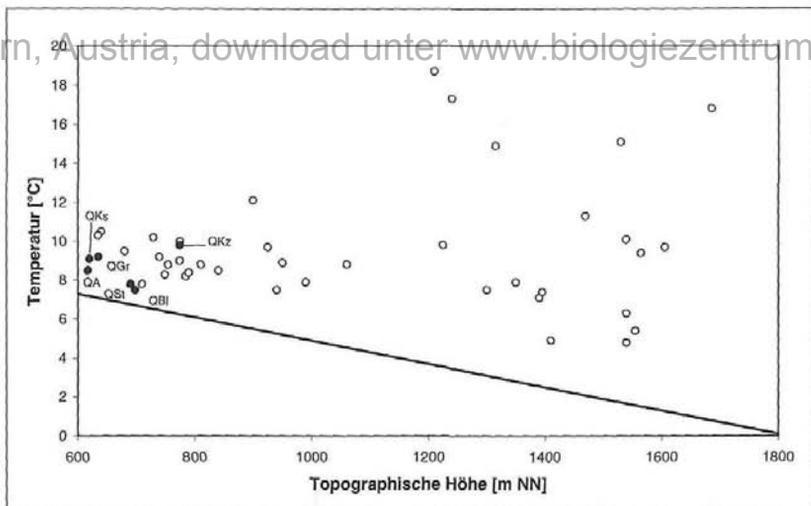
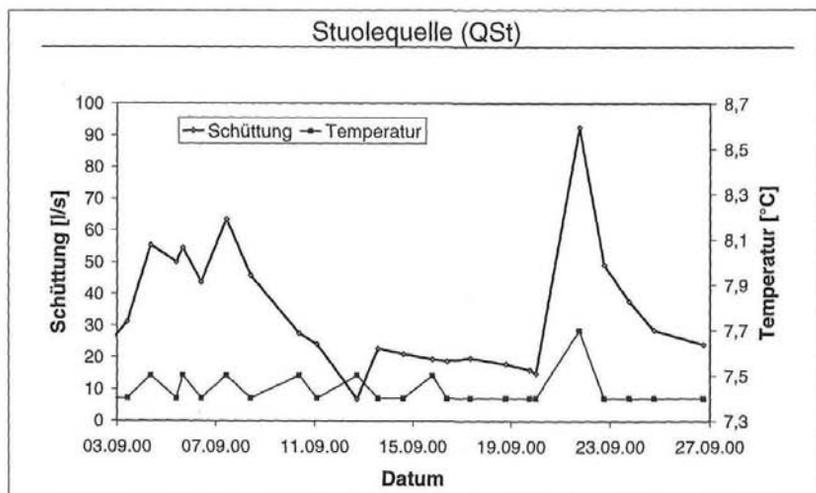
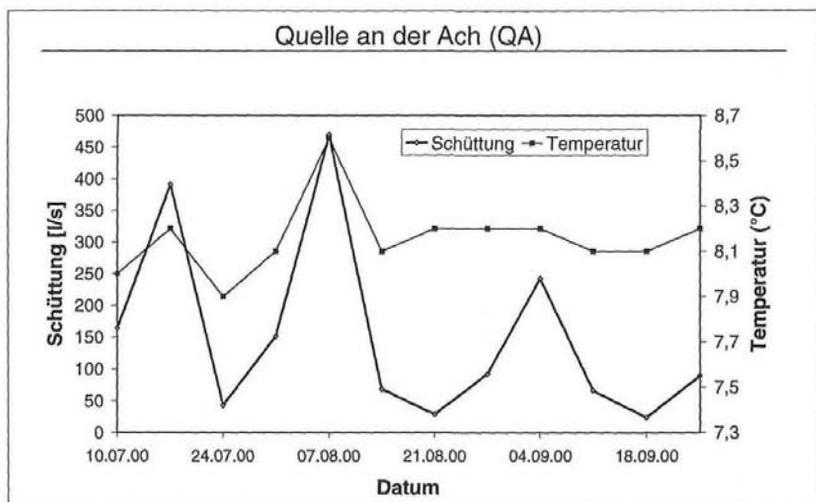


Abb. 18: Ganglinien von Temperatur und Schüttung an der Quelle an der Ach und der Stuoquelle (NEUKUM 2001).



Die Kreuzbodenquelle (QKz) zeigt dagegen wesentlich größere Schwankungen zwischen 3,8 und 10,9 °C. Sie ist also während der Schneeschmelze deutlich „zu kalt“ und im Hochsommer „zu warm“ (Abb. 17). Dies deutet auf einen bedeutenden Zustrom von Oberflächenwasser aus dem angrenzenden Grebenbach.

Die Temperaturen der Kressbachquelle (QKs) schwanken zwischen 8,2 °C im April und 9,1 °C im August. In der Umgebung der Quelle sind keine versickernden Oberflächengewässer vorhanden, so dass dies als Erklärung hier ausscheidet. Vielmehr deuten die Temperaturen darauf hin, dass das Grundwasser im Zustrombereich der Quelle sehr dicht unter der Geländeoberfläche steht und daher durch jahreszeitliche Temperaturschwankungen und insbesondere durch die Schneeschmelze beeinflusst wird.

Das Wasser der Quelle an der Ach (QA) hat meist eine Temperatur zwischen 7,6 und 8,2 °C. Nach heftigen sommerlichen Niederschlägen und Hochwasser in der Bregenzerach steigen die Quelltemperaturen aber sprunghaft auf 8,6 °C. Dies legt den Zustrom von Wasser aus der Bregenzerach nahe, ein Vorgang, der als Uferfiltration bezeichnet wird (Abb. 18).

Die größten Abweichungen der Wassertemperatur wurden aber in den zahlreichen kleinen Quellen des Gebietes gemessen. Diese sind im Sommer um bis zu 13 Grad „zu warm“ und werden demnach aus sehr flachgründigen Hangwasservorkommen gespeist (Abb. 17).

Neben der Temperatur wurden auch der pH-Wert, die spezifische elektrische Leitfähigkeit, der spektrale Absorptionskoeffizient bei 436 nm und die Oxidierbarkeit aller Quellwässer im Gelände oder im Labor gemessen. Diese physikochemischen Kennwerte erlauben weitere wichtige Rückschlüsse auf Herkunft und Qualität der Wässer. An keiner Quelle wurden die entsprechenden Grenzwerte der Trinkwasserverordnung überschritten (NEUKUM 2001).

### 5.3 Mineralstoffe

Jedes Grund- und Quellwasser enthält anorganische Wasserinhaltsstoffe, die oft als Mineralstoffe bezeichnet werden. Die meisten Mineralstoffe haben einen natürlichen Ursprung. Da jedes Gestein aus Mineralen besteht, reichert sich das Grundwasser auf seinem unterirdischen Weg mit Mineralstoffen an. Mineralstoffe können aber auch durch menschliche Aktivitäten ins Wasser gelangen, beispielsweise störendes Nitrat durch das Ausbringen von Mineraldünger. Viele Mineralstoffe können natürlich und künstlich ins Grundwasser gelangen. So wird Natrium bei der Verwitterung von Feldspäten frei – das ist die häufigste Mineralgruppe der Erdkruste –, kommt aber auch durch Streusalz ins Grundwasser.

Fast alle Mineralstoffe sind in geringer Konzentration unschädlich, oft sogar lebensnotwendig, während hohe Gehalte bedenklich sein können. Die Grenzen zwischen lebensnotwendig, unschädlich und bedenklich sind schwer festzulegen und daher umstritten. In den USA sind viele Menschen der Meinung, Trinkwasser solle gar keine Mineralstoffe enthalten und trinken daher destilliertes Wasser. In Europa hält man dies für ungesund und bevorzugt Wasser mit Mineralstoffen, die aber gewisse Grenzwerte nicht überschreiten dürfen. Für Mineral-

wasser gelten diese Grenzwerte jedoch nicht, da Mineralwasser nicht als Lebensmittel sondern als Heilmittel gilt. Es gibt sogar Mineralwasser, das natürliches Arsen enthält und als heilsam angesehen wird, während die selbe Konzentration im Trinkwasser ein Umweltskandal wäre.

Für das hydrogeologische Verständnis eines Gebietes haben Mineralstoffe noch eine weitere Bedeutung: Sie erlauben Rückschlüsse auf den Grundwasserleiter. So besteht Kalkstein chemisch gesehen aus Calciumkarbonat. Quellwasser, das fast nur Calcium und Hydrogenkarbonat enthält, kann daher durch Kalkstein geflossen sein, während Magnesium für Dolomit spricht. Auch die Mischung verschiedener Wässer kann durch Mineralstoffe erkannt werden. So kann ein Quellwasser mit mittlerem Chloridgehalt durch die Mischung zweier Grundwässer mit niedrigem bzw. hohem Chloridgehalt erklärt werden und kann keinesfalls nur von einem der beiden Grundwasservorkommen gespeist werden.

Alle Quellwässer im Gebiet Bezau und Winterstaude wurden auf die wichtigsten anorganischen Anionen (Hydrogenkarbonat, Chlorid, Nitrat, Sulfat, Nitrit) und Kationen (Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium, Eisen, Mangan, Ammonium) untersucht. Die Ergebnisse werden von NEUKUM (2001) vollständig dargestellt und umfassend interpretiert.

In keinem der untersuchten Quellwässer werden für die genannten Wasserinhaltsstoffe die entsprechenden Grenzwerte der Trinkwasserverordnung überschritten. Dies ist zwar erfreulich, aber nicht überraschend, denn alpines Quellwasser ist fast immer gering mineralisiert. Dies liegt an den niedrigen Temperaturen, den oft kurzen Fließzeiten und der geringen Wechselwirkung zwischen Wasser und Gestein in Klüften und Karsthohlräumen, sowie daran, dass kaum zusätzliche Mineralstoffe durch Mineraldünger oder Streusalz eingetragen werden.

Wie in einem Kalkstein-Karstgebiet nicht anders zu erwarten, sind in allen untersuchten Quellwässern Hydrogenkarbonat und Calcium die dominierenden Wasserinhaltsstoffe. In manchen Quellen sind auch Magnesium und Sulfat wichtige Bestandteile. Dagegen kommen Chlorid, Nitrat, Natrium und Kalium nur in geringen Konzentrationen vor. Nitrit, Eisen, Mangan und Ammonium sind meist gar nicht oder nur in winzigen Spuren nachweisbar.

Dabei gibt es interessante Unterschiede zwischen einzelnen Quellgruppen. Exemplarisch werden hier die Calcium- und Magnesium-Konzentrationen diskutiert (*Abb. 19*).

Die Kreuzbodenquelle (QKz) enthält wie die übrigen Quellen im Grebentobel relativ wenig Calcium und Magnesium. Dies deutet darauf hin, dass alle diese Quellen Wasser aus dem Grebenbach erhalten.

Ebenso sind sich die Stuolequelle (QSt) und die benachbarten Karstquellen hydrochemisch sehr ähnlich. Sie enthalten relativ wenig Calcium, aber deutlich mehr Magnesium, als die Kreuzbodenquelle. Das Magnesium kann aus den Drusberg-Mergeln oder aus dem Bergsturz bei Sonderdach stammen. Tatsächlich sind die Quellen, die im Bereich des Bergsturzes entspringen, durch auffällig hohe Gehalte an Calcium und Magnesium charakterisiert.

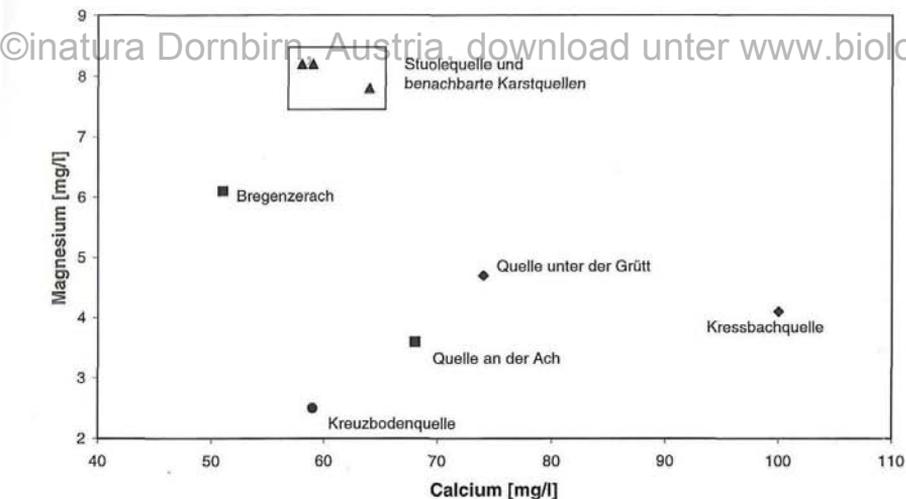


Abb. 19: Calcium- und Magnesiumkonzentrationen wichtiger Quellen und Fließgewässer (NEUKUM 2001).

Obwohl die Quelle an der Ach (QA) nur wenige Meter neben der Bregenzerach austritt, ist die hydrochemische Ähnlichkeit zwischen beiden Wässern gering. Die Quelle enthält wesentlich mehr Calcium und etwas weniger Magnesium, als der Fluss und kann daher nicht nur aus Flusswasser gespeist werden.

Die Kressbachquelle (QKs) unterscheidet sich hydrochemisch von den übrigen Quellen. Sie enthält relativ wenig Magnesium, zeigt aber mit 100 mg/l die höchsten Calcium-Konzentration aller relevanten Quellen. Letzteres spricht für eine intensive Wechselwirkung zwischen Grundwasser und Grundwasserleiter, wie sie in den kalkigen Kiesen und Sanden des Bezauer Talraumes zu erwarten ist. Gleichzeitig wurde in der Kressbachquelle mit 6 mg/l die höchste Nitrat-Konzentration aller Quellen gefunden – immer noch weit unter dem Grenzwert von 50 mg/l. Der relativ erhöhte Nitrat-Wert kann auf die landwirtschaftliche Nutzung im Talraum zurückgeführt werden.

#### 5.4 Bakteriologie

Wie wir gesehen haben, besitzen alle Quellwässer im Gebiet hinsichtlich ihres Gehalts an Mineralstoffen eine gute Trinkwasserqualität. Für die hygienische Beschaffenheit, also den Gehalt an Bakterien, gilt das allerdings nicht. Fast alle untersuchten Quellen erfüllen nicht die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung bzw. überschreiten diese um ein Vielfaches. Das Wasser der Kreuzboden- und Stuoletquelle wird jedoch gefiltert und entkeimt bevor es als hygienisch einwandfreies Trinkwasser ins Leitungsnetz gespeist wird. Das Trinkwasser der Alpen wird zwar meist nicht entkeimt, an Bakterien im Wasser kann man sich aber bis zu einem gewissen Grad gewöhnen. Die Alpbesitzer vertragen das Wasser ihrer Hausquelle daher oft problemlos, während der Magen eines Städters empfindlich reagieren kann.

Der Grund für die recht hohe mikrobielle Belastung der meisten Quellen ist die intensive alpwirtschaftliche (und touristische) Nutzung des Gebietes. Durch die Ausscheidungen der Kühe, sowie durch Abwässer aller Art, gelangen Bakterien ins Grundwasser. Aufgrund der kurzen Verweilzeit des Grundwassers und der großen Öffnungsweite der unterirdischen Karsthohlräume werden die Bakterien bei der Untergrundpassage nicht aus dem Wasser gefiltert und sterben auch nicht ab – Bakterien können mehrere Wochen im Grundwasser überleben. Daher gibt es in fast allen landwirtschaftlich genutzten Karstgebieten Probleme mit Bakterien im Quellwasser.

Wasserproben aller Quellen wurden vom Umweltinstitut Vorarlberg auf Bakterien der Art *Escherichia coli*, auf coliforme Keime, Enterokokken und koloniebildende Einheiten (KBE) untersucht. Dies sind Indikatoren für eine Verschmutzung durch menschliche oder tierische Fäkalien (HÖLL 1986). Nach der Trinkwasserverordnung (BGBl 1998) muss das Trinkwasser frei von Krankheitserregern sein. In einer Wasserprobe (100 ml) dürfen daher keine *Escherichia coli*, keine coliformen Keime (bei 37 und 44 °C) und keine Enterokokken enthalten sein. Außerdem dürfen maximal 100 bzw. 10 (bei 22 bzw. 37 °C) KBE/ml nachweisbar sein.

Die Kreuzbodenquelle erfüllt zwar nicht alle bakteriologischen Grenzwerte, hat aber insgesamt eine recht gute Qualität. Die Stuolequelle ist dagegen stark mikrobiell belastet und überschreitet alle Grenzwerte der Trinkwasserverordnung deutlich. Daher kann auf die Desinfektion ihres Wassers auf keinen Fall verzichtet werden.

Die beste Wasserqualität wurde an der Kressbachquelle (QKs) festgestellt. Sie enthält keine *E. coli*, keine Enterokokken, (fast) keine coliformen Bakterien und auch die Anzahl der koloniebildenden Einheiten liegt deutlich unter dem Grenzwert. Das Wasser der Kressbachquelle kommt also bereits mit (fast) optimaler Trinkwasserqualität aus dem Grundwasserleiter.

## 6. Erkundung der unterirdischen Fließwege durch Markierungsversuche

### 6.1 Grundsätzliches zu Markierungsversuchen

Um die Wasserqualität einer Quelle zu schützen, müssen Schadstoffeinträge in ihrem Einzugsgebiet vermieden oder zumindest begrenzt werden. Dazu muss das Einzugsgebiet der Quelle aber zunächst ermittelt werden – und das ist in alpinen Karstsystemen mit komplizierten geologischen Verhältnissen gar nicht so einfach. Karstgrundwasser fließt oft über viele Kilometer unterirdisch und kann dabei sogar unter Bergen und unter Tälern hindurch fließen (FORD & WILLIAMS 1989). Im Gebiet Hochifien-Gottesacker gibt es eindrucksvolle Beispiele für dieses Verhalten (GOLDSCHIEDER & HÖTZL 2000).

In den vorherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass sich aus der Schichtabfolge, den geologischen Strukturen, sowie den Quellen und dem Gewässernetz wichtige Rückschlüsse auf die unterirdischen Fließwege ziehen lassen. So wurde gezeigt, dass die Kreuzbodenquelle (QKz) vermutlich Zuflüsse aus dem Greben-

bach erhält, während die Stuoquelle (QSt) vermutlich aus den beiden Karstgrundwasserleitern gespeist wird und Zuflüsse aus dem Bergsturz bei Sonderdach erhält.

Die einzige Methode, mit der sich vermutete unterirdische Fließwege im Karst eindeutig beweisen lassen, sind Markierungsversuche, auch Färbe- oder Tracerversuche genannt. Bei einem Markierungsversuch wird an einer oder mehreren Stellen ein Markierungsstoff (Tracer) ins Grundwasser eingegeben und an anderen Stellen wird beobachtet, ob, wann und in welcher Konzentration dieser ankommt. Die wichtigsten Markierungsstoffe sind Fluoreszenzfarbstoffe, toxikologisch unbedenkliche Substanzen mit enormer Färbekraft, die sich noch in winzigen Konzentrationen analytisch nachweisen lassen. Der beste Fluoreszenzfarbstoff ist Uranin mit einer Nachweisgrenze von  $0,005 \mu\text{g/l}$  – das entspricht einem gelösten Zuckerkorn in einem Schwimmbecken! Auch Salze oder winzige Partikel können zur Grundwassermarkierung verwendet werden (KÄSS 1992).

Bei der Verwendung von Fluoreszenzfarbstoffen zur Grundwassermarkierung gibt es vier verschiedene Möglichkeiten zur Probenahme: In Wasserproben lässt sich die exakte Konzentration zum Zeitpunkt der Entnahme messen. Aktivkohlesäckchen werden für längere Zeit in die Quelle eingehängt, damit sich die Farbstoffe anreichern können. Spezielle Messgeräte (Lichtleiter- und Durchflussfluorimeter) erlauben eine kontinuierliche Messung vor Ort. Die visuelle Beobachtung einer sichtbaren Verfärbung ist zwar die einfachste und billigste, aber auch die schlechteste Methode. Die graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Konzentration eines Markierungsstoffs an einer Quelle wird als Durchgangskurve bezeichnet.

Durch einen Markierungsversuch lassen sich vermutete unterirdische Fließwege überprüfen, aus der Fließstrecke und der Fließzeit lässt sich die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers berechnen und aus der Quellschüttung und der Fläche unter der Durchgangskurve kann man berechnen, welche Masse bzw. welcher Anteil des eingegebenen Markierungsstoffs an der Quelle wiedererhalten wurde.

## 6.2 Überblick über den Markierungsversuch im Winterstaude-Gebiet

Am 9. und 11. September 2000 wurde im Gebiet Winterstaude-Bezau ein kombinierter Markierungsversuch mit insgesamt sieben Eingabestellen durchgeführt (E1-E7 in *Abb. 20*). Dabei wurden fünf verschiedene Fluoreszenzfarbstoffe eingesetzt: Naphthionat, Pyranin, Uranin, Eosin und Sulforhodamin. Insgesamt 51 Stellen wurden bis zu 68 Tage lang auf einen möglichen Durchgang der Markierungsstoffe untersucht. Dazu wurden Wasserproben entnommen und Aktivkohlesäckchen eingesetzt und später im Labor in Karlsruhe auf die verwendeten Markierungsstoffe untersucht.

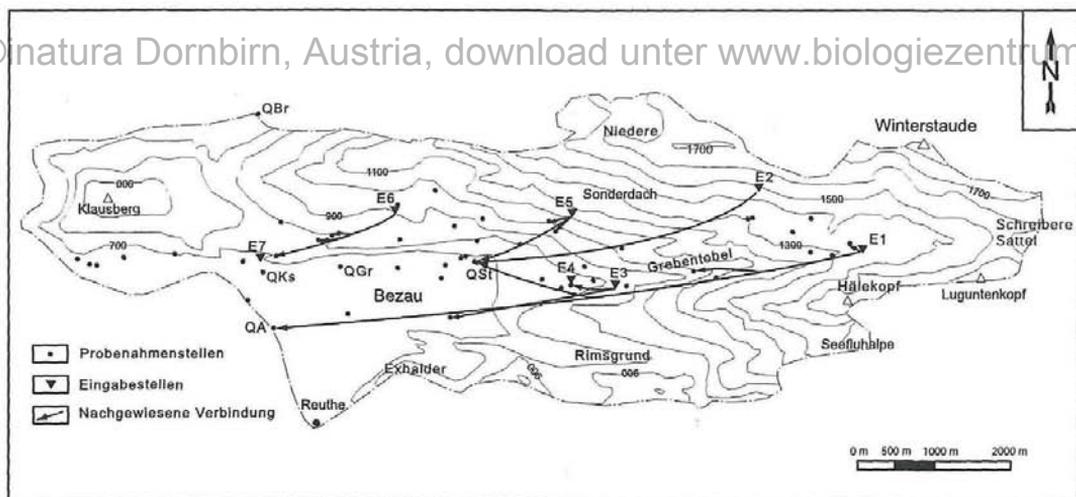


Abb. 20: Der Markierungsversuch vom September 2000 mit Lage der Eingabestellen (E1-E7), der Probenahmestellen (wichtige Quellen mit Kürzel) und Darstellung der nachgewiesenen unterirdischen Fließwege.

Durch den Versuch sollten sowohl praktische, als auch wissenschaftliche Fragen geklärt werden. Für die Marktgemeinde Bezauberg ging es darum, die Einzugsgebiete der Trinkwasserquellen abzugrenzen und die Auswirkungen von Schadstoffeinträge zu bewerten. Von wissenschaftlichem Interesse ist die Erfassung der hydraulischen Eigenschaften der verschiedenen Grundwasserleiter und ihrer Wechselbeziehungen, sowie das vertiefte Verständnis der hydrogeologischen Funktion der geologischen Strukturelemente.

### 6.3 Eingabe der Markierungsstoffe

#### *Bachschwinde Stonger Moos (E1)*

In die Bachschwinde des Schreibernbaches am Westrand des Stonger Mooses wurden 2 kg Eosin eingegeben (Abb. 14). Da der Bach stark mikrobiell belastet ist (NEUKUM 2001), sollte überprüft werden, ob von ihm eine Gefahr für die Trinkwasserquellen ausgeht. Durch diese Eingabe konnte der Karstgrundwasserleiter im Schratenkalk direkt in der Tiefenlinie der Grabentobel-Synklinale markiert werden. Sowohl die Kreuzboden-, als auch die Stuolequelle liegen im Bereich dieser Synklinale.

#### *Karstschacht bei der Rühéalpe (E2)*

Ein kleiner Karstschacht im Örfli-Kalk auf 1490 m Höhe wird als Kühltürmchen der Rühéalpe genutzt. Der eiskalte Luftzug, der hier aus dem Inneren des Berges weht, belegt die Existenz von bedeutenden Hohlraumssystemen im Örfli-Kalk. In den Schacht wurden 3 kg Sulforhodamin eingegeben – vermutlich die erste Eingabe in einen Kühltürmchen in der Geschichte der Hydrogeologie. Um das Sulforhodamin in den trockenen Schacht zu spülen, wurden von der Freiwilligen Feuerwehr Bezauberg 2000 l Wasser bereitgestellt. Durch diese Eingabe sollten Informationen über die hydrogeologischen Eigenschaften des Örfli-Kalks gewonnen werden. Insbesondere sollte überprüft werden, ob das Grundwasser



#### *Abwasserversickerung Sonderdach (E5)*

Die Häuser auf Sonderdach sind nicht an die örtliche Kanalisation angeschlossen und entsorgen daher das anfallende Abwasser über Absetzbecken, deren Überlaufwasser im unterhalb angrenzenden steilen Felssturzgelände nach kurzer Fließstrecke versickert. Um zu überprüfen, ob eine Verbindung zu den Trinkwasserquellen besteht, wurde in die zwei wichtigsten versickernden Gerinne jeweils 0,5 kg Uranin eingegeben.

#### *Bachversickerung Bergvorsäß (E6)*

Bei Bergvorsäß versickert der obere Hundsbach kurz unterhalb seiner Quelle im Örflla-Kalk, der im Bachbett ansteht. Hier wurden 2 kg Pyranin eingegeben, um zu überprüfen, ob die Kressbachquelle (QKs) Zuflüsse aus dem Karstgrundwasserleiter des Örflla-Kalks erhält.

#### *Bachversickerung unterer Hundsbach (E7)*

Kurz vor seiner Einmündung in den Dorfbach und direkt oberhalb der Kressbachquelle versickert der untere Hundsbach im verkarsteten Schratzenkalk. Hier wurde 1 kg Naphthionat eingegeben, um zu überprüfen, ob die Kressbachquelle Zuflüsse aus dem Schratzenkalk-Karstgrundwasserleiter erhält.

#### *Anmerkungen zur Auswahl und Dosierung der Markierungsstoffe*

Die Markierungsstoffe Naphthionat und Pyranin wurden also jeweils an zwei verschiedenen Stellen eingegeben. Aufgrund der Voruntersuchungen war jedoch klar, dass die beiden Eingaben E3 und E4 nur die Kreuzbodenquelle und eventuell weitere Quellen im unteren Grebentobel erreichen können, während die Eingabestellen E6 und E7 mit Sicherheit nicht im Einzugsbereich dieser Quellen liegen. Daher sind Fehlinterpretationen ausgeschlossen.

Alle Fluoreszenzfarbstoffe wurden so dosiert, dass die zu erwartenden Konzentrationen an den Quellen sicher oberhalb der analytischen Nachweisgrenze liegen, gleichzeitig aber möglichst unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze.

#### 6.4 Probenahme und Analytik

Insgesamt 51 Quellen, Bäche und Grundwassermessstellen des Gebietes wurden bis zu 68 Tage lang auf einen möglichen Durchgang der eingesetzten Markierungsstoffe beobachtet (Abb. 20). An allen wichtigen Stellen und insbesondere dort, wo ein Durchgang wahrscheinlich erschien, wurden manuell und mit drei automatischen Probenehmern Wasserproben entnommen und in 50 ml Braunglasfläschchen abgefüllt. Aktivkohlesäckchen wurden an weniger wichtigen Stellen eingehängt, insbesondere dort, wo ein Durchgang der Markierungsstoffe für sehr unwahrscheinlich gehalten wurde. An manchen Stellen wurden sowohl Aktivkohlesäckchen, als auch Wasserproben eingesetzt.

Alle Proben wurden im Labor der Angewandten Geologie Karlsruhe analysiert. Wasserproben können ohne weitere Vorbehandlung direkt gemessen werden, aus Aktivkohle müssen die Fluoreszenzfarbstoffe zunächst mit speziellen Verfahren eluiert werden. Die eigentliche Messung erfolgt in beiden Fällen an

einem Spektralfluorimeter nach dem sogenannten Synchron-Scan-Verfahren.

Dieses Verfahren ist hochempfindlich und erlaubt die exakte Bestimmung von bis zu fünf verschiedenen Fluoreszenzfarbstoffen in einer Probe (KÄSS 1992).

## 6.5 Ergebnisse

### *Überblick*

Im großen und ganzen wurden die erwarteten unterirdischen Fließwege und die angenommenen Einzugsgebiete der Quellen durch den Markierungsversuch bestätigt (*Abb. 20*). Es gab aber auch einige Überraschungen. Von einer kleinen und sehr kurzen Ausnahme abgesehen, kam es an keiner Quelle zu einer sichtbaren Verfärbung. Die vollständigen Ergebnisse werden von NEUKUM (2001) beschrieben, hier werden nur die wichtigsten Befunde kurz dargestellt.

### *Bachschwinde Stonger Moos (E1)*

Das Eosin, das in die Bachschwinde am Stonger Moos eingegeben wurde, konnte an sieben Probenahmestellen nachgewiesen werden.

Bereits 45 Stunden nach der Eingabe erreichte es die Stuolequelle (*Abb. 22*). Die Maximalkonzentration von 70 µg/l wurde nach 60 Stunden gemessen und insgesamt wurden an dieser Quelle 132 g (6,6 %) der eingegebenen 2 kg Eosin wiedergefunden. Die Durchgangskurve an der Bleilequelle (QBl) sieht fast identisch aus. Hier beträgt der Wiedererhalt 118 g (5,9 %).

Auch an den zwei benachbarten Karstquellen wurde zweifelsfrei Eosin nachgewiesen. Die Quelle im Julialoch wurde aber nur mit Aktivkohlesäckchen beprobt und die Quelle östlich der Stuolequelle war während dem Hauptdurchgang des Eosins trocken. Daher können hier keine quantitativen Aussagen getroffen werden.

In den Aktivkohlesäckchen, die in der Quelle des Grebenbachs und einer weiteren kleinen Quelle im Grebentobel eingehängt wurden, konnte ebenfalls Eosin nachgewiesen werden. Drei Tage nach der Eingabe wurden in zwei aufeinanderfolgenden Proben aus der Kreuzbodenquelle (QKz) Spuren von Eosin gefunden. Dieses ist vermutlich nicht auf direktem unterirdischem Weg zur Quelle gelangt, sondern durch Uferfiltration aus dem Grebenbach.

In der Quelle an der Ach (QA) setzte sechs Tage nach der Eingabe ein Eosin-Durchgang ein. Damit ist zweifelsfrei bewiesen, dass ein Teil des Wassers, das in der Bachschwinde am Stonger Moos versinkt, im verkarsteten Schratzenkalk entlang der Grebentobel-Synklinale (II/III) unter dem Bezauer Talraum hindurch fließt, um in der Quelle an der Ach auszutreten. Insgesamt wurden dort 326 g (16 %) des eingegebenen Eosins wiedergefunden, mehr als an Stuole- und Bleilequelle zusammen. Die Quelle an der Ach ist damit nicht nur der tiefste, sondern auch der wichtigste Auslass des Karstsystems. Der Temperaturanstieg der Quelle bei Hochwasser in der Bregenzerach belegt jedoch einen Zustrom von Flusswasser.

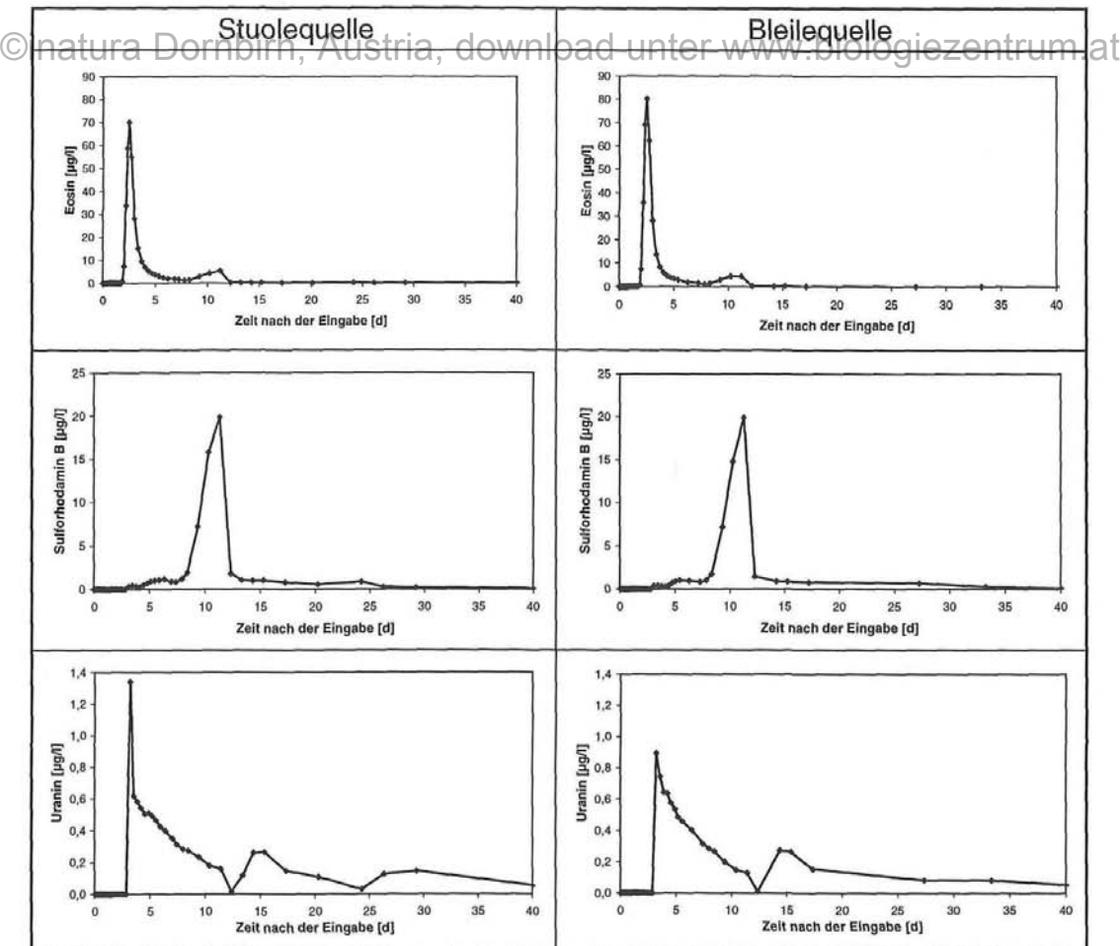


Abb. 22: Durchgangskurven von Eosin (Eingabe E1), Sulfurhodamin (E2) und Uranin (E5) an der Stuoelle (QSt) und der Bleilequelle (QBI).

#### Karstschacht bei der Rühlealpe (E2)

Etwa drei Tage nach der Eingabe in den Karstschacht bei der Rühlealpe erreichte das Sulfurhodamin die Stuoelle- (QSt) und die Bleilequelle (QBI), sowie die beiden benachbarten kleinen Karstquellen (Abb. 20). Die Durchgangskurven der beiden Hauptquellen sehen nahezu identisch aus. In den ersten Tagen wurden nur sehr niedrige Konzentrationen gemessen, doch nach elf Tagen wurde mit etwa 20 µg/l ein scharfes Maximum erreicht (Abb. 22). An der Stuoellequelle wurden 187 g (6,2 %) des Farbstoffs wiedererhalten und an der Bleilequelle 130 g (4,3 %). Diese Ergebnisse beweisen, dass das Grundwasser aus dem Örflla-Kalk in den Schratzenkalk übertritt. Dabei werden die trennenden Drusberg-Mergel vermutlich entlang von Störungen durchquert.

#### Grebenbach (E3)

Das Naphthionat, das stromaufwärts der Kreuzbodenquelle (QKz) in den Grebenbach eingegeben wurde, kam nach nur fünf Stunden in der Quelle an und erreichte nach neun Stunden die Maximalkonzentration von 2166 µg/l (Abb.

23). Gut, dass für diese Eingabe das unsichtbare Naphthionat gewählt wurde, denn jeder andere Fluoreszenzfarbstoff führt in so hoher Konzentration zu einer kräftigen Rot- oder Grünfärbung im Wasser. Der Wiedererhalt beträgt 636 g (13 %). Die Ergebnisse beweisen, dass die Kreuzbodenquelle selbst bei geringer Wasserführung im Grebentobel einen bedeutenden und sehr schnellen Zufluss vom Grebenbach erhält. Naphthionat wurde außerdem in der Grundwasser-messstelle 30.2.09 im Talraum von Bezau nachgewiesen.

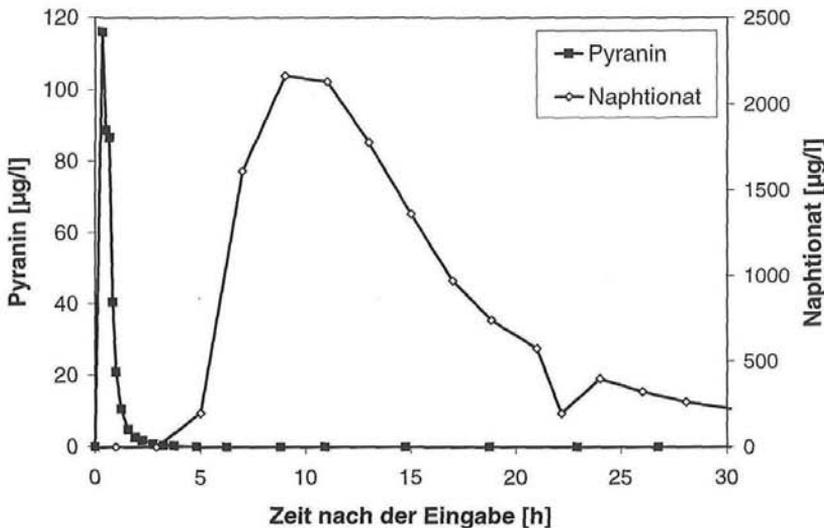


Abb. 23: Durchgangskurven von Naphthionat und Pyranin an der Kreuzbodenquelle (QKz).

#### Fassungsbereich der Kreuzbodenquelle (E4)

Da Pyranin direkt über den Sickersträngen der Kreuzbodenquelle (QKz) ausgebracht wurde, war es von vornherein klar, dass es im Quellwasser ankommen würde. Überraschend war jedoch, wie schnell das ging! Unmittelbar nach dem künstlichen Starkregen färbte sich das Wasser in der Quellstube kurzzeitig sichtbar grün. Die Proben wurden im Wasserwerk entnommen. Hier wurde 20 Minuten nach der Eingabe die Maximalkonzentration von 116 µg/l gemessen. Bereits nach etwa 4 Stunden war der Durchgang beendet (Abb. 23). Der Wiedererhalt beträgt 4,5 g (4,5 %). Die Ergebnisse zeigen, dass die Deckschichten über den Sickersträngen der Kreuzbodenquelle nur eine geringe Schutzfunktion ausüben. Mögliche Schadstoffeinträge auf der Wiese können bei Starkregen praktisch sofort ins Trinkwasser gelangen.

#### Abwasserversickerung Sonderdach (E5)

Das Uranin, das in die beiden Abwasserversickerungen auf Sonderdach eingegeben wurde, erreichte mindestens sieben Probenahmestellen. Drei Quellen bzw. Quellgruppen, die auf dem steilen Hang unterhalb Sonderdach austreten, wurden mit Aktivkohlesäckchen beprobt. Hier wurden teils hohe Uranin-Gehalte festgestellt (NEUKUM 2001).

An der Stuole- (QSt) und Bleilequelle (QBl) wurden wiederum nahezu identische Durchgangskurven gemessen (Abb. 22). Das Uranin trat zuerst nach drei Tagen auf und zwar bereits in der jeweiligen Maximalkonzentration von 1,4 bzw. 0,9 µg/l. Der große Konzentrationsunterschied liegt wahrscheinlich nur daran, dass an der Stuolequelle zufälligerweise genau am Maximum eine Probe genommen wurde, während dieser Zeitpunkt an der Bleilequelle knapp verpasst wurde. An der Stuolequelle wurden 17 g (1,7 %) des Uranins wiedergefunden und an der Bleilequelle 18 g (1,8 %). Auch in den beiden benachbarten Karstquellen wurde Uranin nachgewiesen.

Die sechs Grundwassermessstellen im Talraum von Bezau (30.2.02-09) wurden mit Wasserproben und Aktivkohlesäckchen beobachtet. In keiner Wasserprobe konnte Uranin nachgewiesen werden. In den Aktivkohlesäckchen aus fünf Messstellen wurden dagegen winzige Spuren von Uranin gefunden, allerdings auch schon vor der Eingabe. Ein Zusammenhang mit Sonderdach ist daher nicht zu belegen (NEUKUM 2001). Uranin ist in manchen Kosmetika und Reinigungsmitteln enthalten und kann daher auf vielen Wegen ins Grundwasser gelangen.

Anders sieht es mit dem Versuchsbrunnen (BP 6) und der Grundwassermessstelle (BP 10) des Pumpwerks Andelsbuch aus. Auch hier war zwar bereits vor der Eingabe eine gewisse Uranin-Grundlast vorhanden, 11 bis 17 Tage nach der Eingabe wurde aber in BP 6 ein geringer und in BP 10 ein sehr starker Anstieg des Uranin-Gehalts festgestellt. Dieser Befund spricht für eine (vermutlich indirekte) hydraulische Verbindung mit Sonderdach (NEUKUM 2001).

#### *Bachversickerung Bergvorsäß (E6)*

Die drei Quellen, an denen das Pyranin der Eingabestelle E6 auftrat, liegen alle am Hundsbach und wurden ausschließlich mit Aktivkohlesäckchen beprobt, so dass keine exakten Werte für Konzentration, Fließzeit und Wiedererhalt angegeben werden können.

Weder in der Quelle unter dem Grütt (QGr), noch in der Kressbachquelle (QKs) wurde Pyranin nachgewiesen. Dieser Befund legt nahe, dass diese Quellen kein Karstwasser aus dem Örf-la-Kalk erhalten. Allerdings wurde bei anderen Markierungsversuchen im Karst festgestellt, dass Pyranin ein unsicherer Markierungsstoff ist, der manchmal sehr rasch und vollständig im Grundwasser abgebaut werden kann (GOLDSCHIEDER et al. 2001). Um den Zufluss von Karstwasser zur wichtigen Kressbachquelle sicher auszuschließen, sollte diese Eingabe daher mit einem besseren Markierungsstoff (Uranin) wiederholt werden.

#### *Bachversickerung unterer Hundsbach (E7)*

Das Naphthionat, das in die Versickerungsstrecke des unteren Hundsbachs eingegeben wurde, wurde an keiner Probenahmestelle wiedergefunden, insbesondere nicht an der Kressbachquelle, die sich nur wenige hundert Meter unterhalb befindet. Die negativen Befunde zeigen, dass die Kressbachquelle keine nennenswerten Zuflüsse aus dem Schratzenkalk-Karstgrundwasserleiter erhält. Vermutlich ist das Naphthionat zu einer kleinen Quelle am Ausgang des Hundsbachs geflossen, die allerdings nur mit Aktivkohle beprobt wurde – Naphthionat kann aber nur in Wasserproben nachgewiesen werden.

## 7. Verletzlichkeit und Schutz des Grundwassers

### 7.1 Landnutzung und Grundwasserschutz

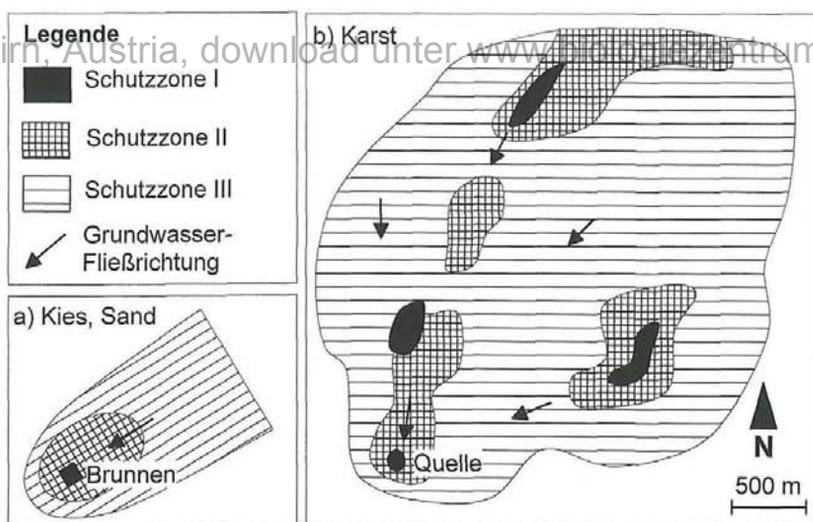
Da der größte Teil unseres Trinkwassers Grundwasser ist, besitzt dessen Schutz eine hohe Bedeutung. Grundwasser gilt generell als Schutzgut, das nicht verschmutzt werden darf. Tatsächlich führt aber fast jede Form der Landnutzung zur Freisetzung von Schadstoffen. Besonders gefährlich sind natürlich die Sickerwässer von (schlecht platzierten und schlecht gebauten) Mülldeponien, Tankstellen und Industriekomplexen. Aber auch von vergleichsweise harmlosen Formen der Landnutzung kann eine Gefahr für das Grundwasser ausgehen: Sei es das Ausbringen von natürlichen oder künstlichen Düngemitteln auf Feldern, Äckern und in Gärten, oder die Ausscheidungen von Tieren auf Weideflächen.

Natürlich ist es besonders wichtig, die zur Trinkwasserversorgung genutzten Quellen und Brunnen vor Verunreinigungen zu schützen. Daher gibt es hierfür besondere Regelungen: In Deutschland sind dies die Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete (DVGW 1995), in Österreich die sehr ähnliche Richtlinie für Schutz- und Schongebiete (ÖVGW 1995). Innerhalb eines Schutzgebietes können drei verschiedene Zonen unterschieden werden:

- Schutzzone I ist der unmittelbare Fassungsbereich. Dieser sollte Eigentum des Wasserversorgungsunternehmens sein und eingezäunt werden. Außer Rasenmähen ist hier jede Art der Landnutzung untersagt.
- Die Schutzzone II dient dem Schutz vor bakteriologischen Verunreinigungen. Da viele Bakterien im Grundwasser nach etwa 60 Tagen absterben (in Deutschland schon nach 50 Tagen), ist die sogenannte 60-Tagesgrenze (bzw. 50-Tages-Linie) das Hauptkriterium zur Abgrenzung der Zone II. Das ist diejenige Linie, von der aus das Grundwasser 60 (bzw. 50) Tage benötigt, um zur Quelle oder zum Brunnen zu strömen. Die Mächtigkeit und Durchlässigkeit der Deckschichten kann als zusätzliches Kriterium berücksichtigt werden. In Zone II gelten strenge Einschränkungen für die Landwirtschaft und für Bauvorhaben.
- Die Schutzzone III soll das Trinkwasser vor weitreichenden chemischen Verunreinigungen schützen. Sie umfasst meist das gesamte Einzugsgebiet, kann aber unter bestimmten Umständen reduziert oder weiter unterteilt werden. Hier gelten weniger strenge Auflagen.

Die Anwendung dieses Konzepts in Grundwasserleitern aus Sand und Kies führt meist zu einer gestaffelten Anordnung annähernd elliptischer Schutzzonen: Zone I umschließt den Brunnen in einem Umkreis von meist 20 m, Zone II reicht wenige hundert Metern weit und Zone III bis zu einigen Kilometern (Abb. 24).

Abb. 24: Typische Anordnung von Trinkwasserschutz-zonen:  
a) gestaffelte Anordnung annähernd elliptischer Zonen im Zustrombereich eines Brunnens in einem Porengrundwasserleiter aus Sand und Kies;  
b) Zonenmosaik im Einzugsgebiet einer Karstquelle.



## 7.2 Die besondere Situation im Karst und das Konzept der Vulnerabilität

Im Karst gelten im Prinzip die gleichen Richtlinien, wie in anderen Grundwasserleitern. Allerdings sind die Fließgeschwindigkeiten im Karst oft sehr hoch (10-1000 m/h) und die Einzugsgebiete meist sehr groß (häufig über 100 km<sup>2</sup>). Die konsequente Anwendung der 60-Tagesgrenze (bzw. 50-Tages-Linie) im Karst würde daher zu einer enormen Ausdehnung der Zone II führen. Aus Gründen des Trinkwasserschutzes wäre dies zwar wünschenswert, die resultierenden Nutzungseinschränkungen sind aber ökonomisch meist nicht akzeptabel. Daher gilt es, einen Kompromiss zwischen Trinkwasserschutz und Landnutzung zu finden.

Dies führt zum Konzept der Vulnerabilität (Verletzlichkeit) des Grundwassers gegenüber Schadstoffeinträgen. Der Begriff leitet sich aus dem lateinischen Verb *vulnerare* ab, was *verletzen* bedeutet. Flächen, in denen das Grundwasser von mächtigen, gering durchlässigen Schichten überdeckt wird, sind sehr gut vor Schadstoffeinträgen geschützt und gelten daher als Zonen geringer Vulnerabilität. Dagegen gelten Flächen, in denen schützende Deckschichten fehlen, als Zonen hoher Vulnerabilität. Bei der Vulnerabilitätskartierung geht es also darum, Bereiche unterschiedlicher Vulnerabilität zu erfassen und auf Karten darzustellen. Der Kompromiss besteht nun darin, auf Flächen geringer Vulnerabilität der Landnutzung und auf Flächen hoher Vulnerabilität dem Trinkwasserschutz den Vorrang zu geben. HÖTZL (1996) weist jedoch darauf hin, dass diese Vorgehensweise einen geringeren Schutz des Trinkwassers bedeutet, als die konsequente Anwendung der 60-Tagesgrenze (bzw. 50-Tages-Linie).

Die Ausweisung von Schutz-zonen auf der Grundlage einer Vulnerabilitätskarte führt im Karst oft zu einem Mosaik von Schutz-zonen (Abb. 24). Das Konzept der Vulnerabilität ist keineswegs auf den Karst beschränkt, sondern kann für alle Typen von Grundwasservorkommen verwendet werden. Aufgrund der besonderen Eigenschaften von Karstgebieten ist die Kartierung der Vulnerabilität dort aber besonders relevant und mit besonderen Schwierigkeiten verbunden.

### 7.3 Die PI-Methode und der Europäische Ansatz zur Vulnerabilitätskartierung

Um europaweit ein einheitliches Konzept und – wenn möglich – eine universell anwendbare Methode zur Vulnerabilitätskartierung in Karstgebieten zu entwickeln, wurde von der Europäischen Kommission die COST Action 620 „vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers“ eingerichtet. Die deutschen Vertreter in diesem europäischen Programm sind der Lehrstuhl für Angewandte Geologie Karlsruhe (AGK) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover (BGR).

Im Rahmen der COST 620 wurde am Karlsruher Lehrstuhl die PI-Methode entwickelt (GOLDSCHIEDER et al. 2000). Sie dient der Kartierung der Vulnerabilität von Grundwasservorkommen, wobei auch die speziellen Eigenschaften von Karstgebieten berücksichtigt werden können. Die Vulnerabilität wird durch die Multiplikation zweier Faktoren abgeschätzt: Der P-Faktor (Protective cover) beschreibt die Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung in Abhängigkeit von der Mächtigkeit und der Durchlässigkeit aller Schichten zwischen Gelände- und Grundwasseroberfläche – Boden, Lockergestein, nicht verkarstetes Festgestein und ungesättigtes Karbonatgestein (Abb. 25).

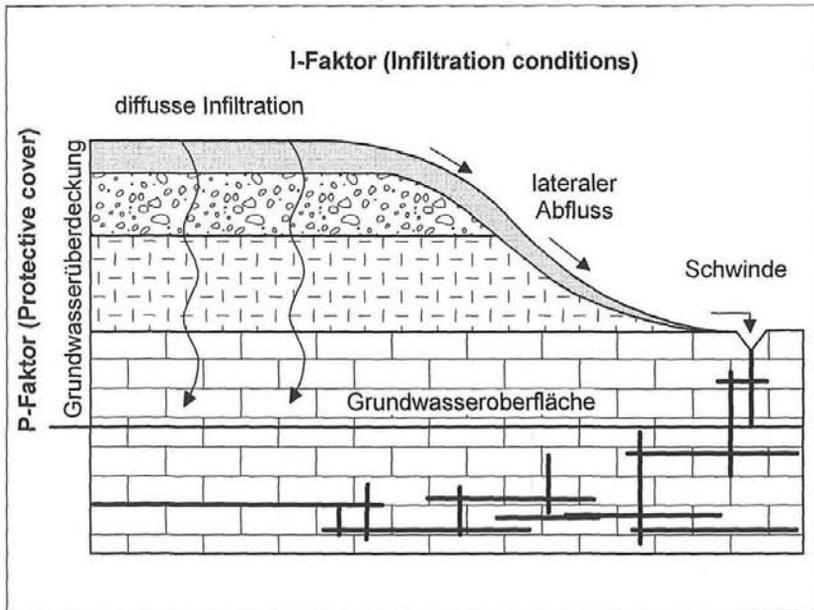


Abb. 25: Erläuterung der PI-Methode: Der P-Faktor beschreibt die Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung, also aller Schichten zwischen Gelände- und Grundwasseroberfläche – Boden, Lockergestein, nicht verkarstetes Festgestein und ungesättigtes Karbonatgestein. Der I-Faktor beschreibt die Umgehung der Grundwasserüberdeckung durch laterale Abflusskomponenten im Einzugsgebiet von Schwinden (nach GOLDSCHIEDER et al. 2000).

Die Grundwasserüberdeckung kann Schadstoffe aber nur dann zurückhalten oder zumindest abmildern, wenn diese mit dem Regenwasser diffus infiltrieren und alle Schichten langsam durchsickern. Dies ist gerade im Karst oft nicht der Fall. Durch Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet von Schwinden und Dolinen können die Deckschichten umgangen und ihre Schutzwirkung außer Kraft gesetzt werden. Der I-Faktor (Infiltration conditions) beschreibt daher die Umgehung der Grundwasserüberdeckung durch laterale Abflusskomponenten.

Die PI-Methode wird vermutlich in modifizierter Form in einen Europäischen Ansatz zur Vulnerabilitätskartierung nach COST 620 einfließen, der allerdings

noch in Diskussion ist: In diesem Ansatz beschreibt der O-Faktor (overlying layers) die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung und der C-Faktor (concentration of flow) berücksichtigt die Umgehung dieser Schutzfunktion durch laterale Abflusskonzentration (DALY et al. 2001).

#### 7.4 Vulnerabilitätskartierung im Untersuchungsgebiet

Im Gebirgszug der Winterstaude wurde von WERZ (2001) eine Vulnerabilitätskarte nach der PI-Methode (GOLDSCHIEDER et al. 2000) angefertigt, die allerdings nach den Vorschlägen von COST 620 modifiziert wurde (DALY et al. 2001). Es wurde also ein vorläufiger Europäischer Ansatz angewendet. Die im Gelände erfassten Daten wurden mit dem Geoinformationssystem ARC INFO und ArcView ausgewertet und kartografisch dargestellt. Ziel der Kartierung ist es, die Verletzlichkeit des Karstgrundwassers gegenüber Schadstoffeinträgen darzustellen.

Als erster Schritt wurde eine Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung erstellt (Abb. 26 oben). Dazu wurde die Verbreitung, Mächtigkeit und Durchlässigkeit aller Schichten zwischen Gelände- und Grundwasseroberfläche kartiert und deren Schutzfunktion bewertet. Aufgrund der schlechten Datenbasis handelt es sich dabei nicht um exakte Werte, sondern um Schätzwerte. Der Schrattenkalk ist meist stark verkarstet und nur mit lückenhaften, dünnen Böden bedeckt. Flächen mit Schrattenkalk haben daher eine sehr geringe bis geringe Schutzfunktion. Der Örfle-Kalk ist geringer verkarstet und oft mit lehmigen Böden bedeckt. Hier wurde eine geringe bis mittlere Schutzfunktion ermittelt. Die verschiedenen Mergel-Formationen besitzen eine hohe bis sehr hohe Schutzfunktion. Quartäre Ablagerungen besitzen nur eine lokale Bedeutung (WERZ 2001). Die Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung spiegelt demnach die geologischen Verhältnisse wieder.

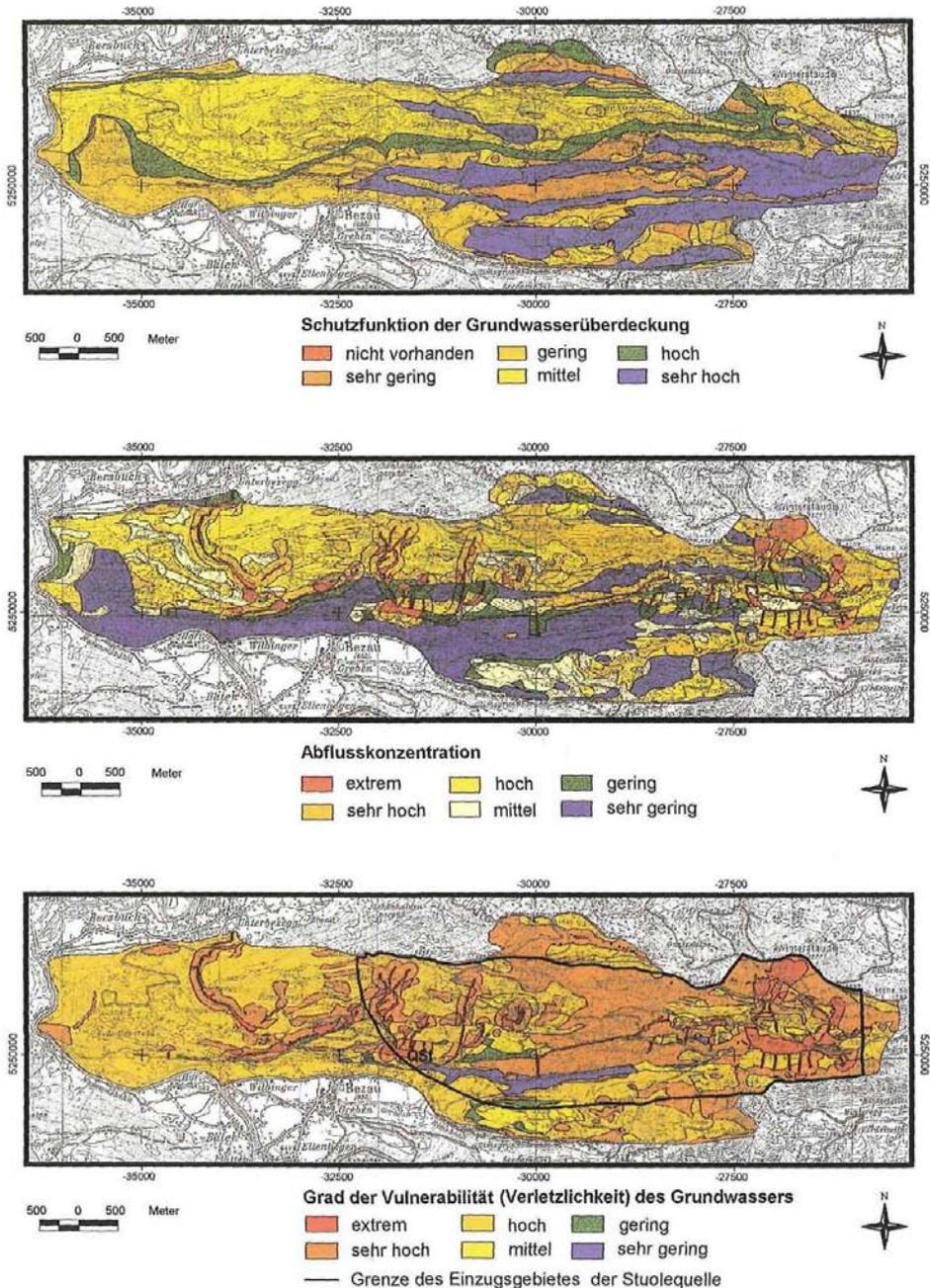
Gebiete, die aus Mergel aufgebaut werden, entwässern jedoch häufig oberirdisch in Bäche, die versickern oder versinken, sobald sie verkarsteten Kalkstein erreichen. So erhält der Schreiberebach viele oberirdische Zuflüsse von kleinen Bächen, die auf Mergel entspringen. Am westlichen Ende des Stonger Mooses versinkt er über eine Bachschwinde im Schrattenkalk. Die Schutzfunktion der Mergel wird also umgangen und außer Kraft gesetzt.

Als zweiter Schritt wurden daher von WERZ (2001) eine Karte der Abflusskonzentration konstruiert (Abb. 26 Mitte). Die Art und Intensität lateraler Abflussvorgänge hängt von der Durchlässigkeit und Mächtigkeit des Bodens, der Hangneigung und der Vegetation ab (GOLDSCHIEDER et al. 2000). Laterale Abflüsse stellen aber nur dann eine Gefahr für das Karstgrundwasser dar, wenn sie an anderer Stelle im Karst versickern oder in einer Schwinde versinken. Die Karte der Abflusskonzentration spiegelt daher die Verbreitung lehmiger Böden, gering durchlässiger Gesteine und steiler Hänge im Einzugsgebiet versinkender und versickernder Fließgewässer wieder.

Die Vulnerabilitätskarte wurde durch Kombination der beiden Karten konstruiert, wobei der P- und der I-Faktor multipliziert wurden. Dabei zeigt sich, dass nahezu das gesamte Gebiet eine hohe bis sehr hohe Vulnerabilität aufweist

(Abb. 26 unten). Gebiete mit verkarstem Kalkstein sind verletzlich, weil kaum schützenden Deckschichten vorhanden sind, und Gebiete mit anstehendem Mergel sind verletzlich, weil sie meist lateral in angrenzende Karstgebiete hinein entwässern. Insbesondere in Gebieten mit mächtigen Quartären Ablagerungen wurde lokal eine mittlere bis geringe Vulnerabilität kartiert. Eine sehr geringe Vulnerabilität kann nur solchen Flächen zugeordnet werden, in denen der Karstgrundwasserleiter von gering durchlässigen Mergeln überlagert wird, welche oberirdisch aus dem Karstgebiet heraus entwässern. Bachschwinden und versinkende Bäche sind dagegen Bereiche extremer Vulnerabilität.

Abb. 26: Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (oben), Karte der Abflusskonzentration (Mitte), und Vulnerabilitätskarte (unten). Für das schwarz umrandete Einzugsgebiet der Stuoquelle (QSt) können Schutzzonen ausgewiesen werden.



Auf der Vulnerabilitätskarte ist die Verletzlichkeit des Karstgrundwassers dargestellt. Sie kann daher für die Ausweisung von Schutzzonen für die Stuolequelle (QSt) verwendet werden, denn diese Quelle fördert Wasser aus den beiden Karstgrundwasserleitern. Für Quellen, die nicht aus einem der beiden Karstgrundwasserleiter gespeist werden, hat die Karte jedoch keinerlei Bedeutung. Die Karte sagt daher nichts über Schutz und Gefährdung der Kreuzboden- und Kressbachquelle aus, die ja beide keine Karstquellen sind.

## 8. Schlussfolgerungen

### 8.1 Zusammenhang zwischen geologischer Struktur und Karstentwässerung

Die Hydrogeologie im Karstgebiet der Winterstaude wird in erster Linie von den geologischen Gegebenheiten kontrolliert, also von der Schichtabfolge, dem Faltenbau und dem Störungsmuster. Daneben sind hydrographische und topographische Faktoren von Bedeutung, insbesondere die Ausrichtung der ober- und unterirdischen Entwässerung auf die Bregenzerach als Vorfluter.

Die Schichtabfolge bestimmt die hydrogeologische Gliederung des Gebietes in Grundwasserleiter und Grundwasserstauer. Im Karstgebiet der Winterstaude gibt es zwei Karstgrundwasserleiter – den Örflla-Kalk und den Schrattenkalk (Abb. 27). Der Örflla-Kalk ist etwa 160 m mächtig und wird von den undurchlässigen Palfris-Mergeln unterlagert, die den Liegendstauer des Karstsystems bilden. Die 60 m mächtigen Drusberg-Mergel fungieren als Zwischenstauer und trennen den Örflla-Kalk von dem überlagernden, 100 m mächtigen Schrattenkalk. Dieser wird lokal von den fast undurchlässigen Amdener-Mergeln nach oben abgedichtet. Diese sind demnach der Hangendstauer des Karstsystems.

Der Örflla-Kalk baut nahezu den gesamten Höhenrücken des Gebirgszuges der Winterstaude auf und bildet gewissermaßen dessen Kern. Der gefaltete Schrattenkalk umhüllt dagegen die Basis des Gebirgszuges und steht vor allem in den umgebenden Tälern und am Fuß der Hänge an. In den Hochlagen des Gebietes mit anstehendem Örflla-Kalk findet zwar eine bedeutende Grundwasserneubildung durch versickernde Niederschläge und Schmelzwässer statt, größere Quellen gibt es dort jedoch kaum (Ausnahme: Quelle in der Bezegg). Statt dessen entspringen fast alle bedeutenden Karstquellen aus dem Schrattenkalk. Das Grundwasser aus dem Örflla-Kalk muss daher in den Schrattenkalk übertreten und dabei den Zwischenstauer der Drusberg-Mergel durchqueren. Dies ist an Störungen möglich, deren Versatz in der gleichen Größenordnung liegt, wie die Mächtigkeit der Mergel. Die hydraulische Verbindung zwischen den beiden Karstgrundwasserleitern wurde durch den Markierungsversuch belegt: Das Sulforhodamin, das in den Örflla-Kalk eingegeben wurde (E2), erreichte die Stuolequelle (QSt) und die benachbarten Karstquellen, die alle aus dem Schrattenkalk entspringen (NEUKUM 2001).

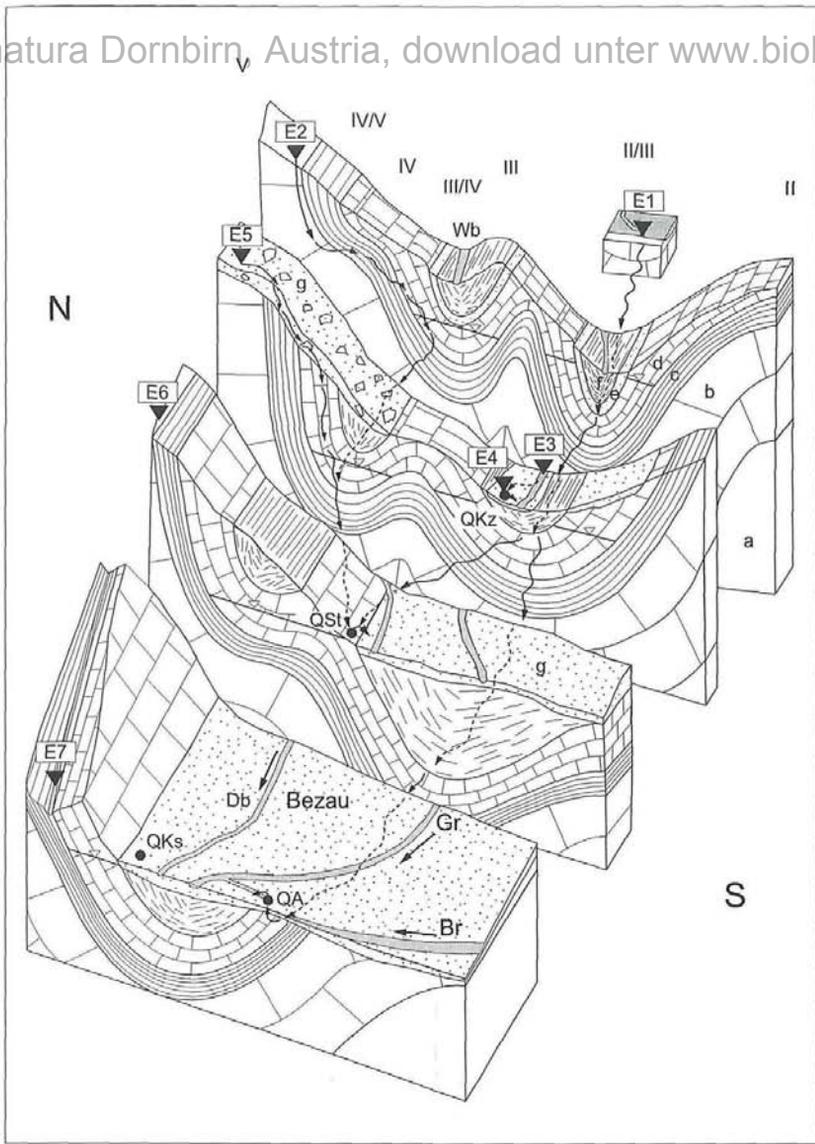


Abb. 27: Schematisches hydrogeologisches Blockbild des Untersuchungsgebietes mit Darstellung der Eingabestellen (E1-7), der wichtigen Quellen (Q..) und der durch den Markierungsversuch belegten unterirdischen Fließwege (nach Neumann 2001).  
a: Palfris-Mergel, b: Örfla-Kalk, c: Drusberg-Mergel, d: Schrattenkalk, e: Garschella-Formation, f: Amdener Mergel, g: Quartär; Br: Bregenzerach, Db: Dorfbach, Gr: Grebenbach, Wb: Wildmoosbach.

Durch die Wechsellagerung zwischen stauenden und durchlässigen Schichten erfolgt der unterirdische Abfluss meist parallel zu den Schichten. Die stauenden Mergel bilden also stratigraphische Leitelemente der Karstentwässerung. Erst dadurch werden die Falten als tektonische Leitelemente der Karstentwässerung wirksam (GOLDSCHIEDER & HÖTZL 2000). Oberhalb des Talniveaus, also in den Hochlagen des Gebietes, bilden die Tiefenlinien der abtauchenden Synklinalen (Faltenmulden) die wichtigsten Fließpfade des Karstgrundwassers. Das Gebiet ist daher ein Beispiel für synklinalkonforme Karstentwässerung im Sinne von ORTH (1992). Die Scheitellinien der Antiklinalen (Faltensättel) sind lokale Wasserscheiden und die Kulimationslinie der Falten am Ostrand des Gebietes, also im Bereich des Schreiberesattels, formt eine regionalen Wasserscheide zwischen der Bregenzerach und der Subersach.

Die wichtigste und längste unterirdische Abflussbahn ist die Grebentobel-Synklinale (II/III). Durch die Eosin-Eingabe in E1 konnte hier ein durchgehender Fließpfad vom Stonger Moos bis zur Quelle an der Ach (QA) belegt werden (Abb. 27). Andere Falten sind diskontinuierlich und nicht sehr ausgeprägt und daher auch in ihrer hydrogeologischen Wirksamkeit eingeschränkt. Beispielsweise haben die Synklinale IV/V und die angrenzende Antiklinale IV keinen erkennbaren Einfluss auf die Karstentwässerung.

Nahe des Vorflutniveaus, also am Fuß des Gebirgszuges und im Bereich des Talraumes, sind die Synklinalen oft vollständig mit Grundwasser erfüllt. Dieses kann überlaufen und dabei über die Scheitellinien der Antiklinalen hinweg fließen. So kann sich das Grundwasser aus angrenzenden Synklinalen vermischen. Aus dem selben Grund liegen die Quellen im Talbereich meist nicht in der Tiefenlinie einer Synklinale, sondern auf der Scheitellinie einer Antiklinale oder auf einem Faltenschenkel. So entspringt die Stuolequelle (QSt) im Bereich der Rumplat-Antiklinale und erhält Zufluss von der südlich angrenzenden Grebentobel-Synklinale und von der nördlich angrenzenden Wildmoos-Antiklinale – eindeutig belegt durch die Eingaben E1 und E2. Auch die Quelle an der Ach (QA) entspringt nicht in der Tiefenlinie, sondern auf dem Südschenkel der Grebentobel-Synklinale.

Das Gebirgsmassiv der Winterstaude wird durch vier Mechanismen entwässert, zwischen denen eine vielfältige Wechselwirkung besteht: Oberflächenabfluss, seichter Karstabfluss, tiefer Karstabfluss und Infiltration in den Porengrundwasserleiter.

Oberflächenabfluss tritt in Bereichen auf, die von gering durchlässigen Mergeln aufgebaut werden, also entlang der Tiefenlinien von Synklinalen und auf den Faltenschenkeln zwischen den beiden Kalkstein-Formationen. Die Fließgewässer versinken oder versickern häufig, sobald sie verkarsteten Kalkstein erreichen.

Seichter Karstabfluss findet dort statt, wo die Basis des betrachteten Karstgrundwasserleiters oberhalb des Vorflutniveaus liegt, also oberhalb des Bezauer Talraumes. Der seichte Karst wird vor allem von der Stuolequelle und den benachbarten Karstquellen entwässert (Abb. 28). Diese erhalten Zuflüsse von beiden Karstgrundwasserleitern und entwässern mehrere Synklinalen.

Tiefer Karstabfluss liegt dann vor, wenn die Basis des Karstgrundwasserleiters unterhalb des Vorflutniveaus liegt. So setzt sich der verkarstete Schrattekalk in der Grebentobel-Synklinale unter dem Talraum von Bezau bis zur Quelle an der Ach fort. Hier liegt also tiefer Karstabfluss vor. Da der Schrattekalk von nahezu undurchlässigen Amdener Mergeln bedeckt wird, ist im tiefen Karst mit gespanntem, teilweise auch artesischem Grundwasser zu rechnen.

Ein Teil des Wassers aus dem Gebirgszug der Winterstaude trägt zur Grundwasserneubildung im Bezauer Talraums bei. Zum einen versickert Wasser aus dem Grebenbach und anderen Bächen in den Talkiesen, zum anderen belegen der Markierungsversuch und die Grundwassergleichen (NEUKUM 2001), dass es einen direkten, unterirdischen Übertritt von Karstwasser in den Porengrundwasserleiter gibt. Im Talraum infiltrierende Niederschläge haben natürlich auch einen bedeutenden Anteil an der Grundwasserneubildung. Der Porengrundwasserleiter wird unter anderem von der Kressbachquelle (QKs) entwässert.

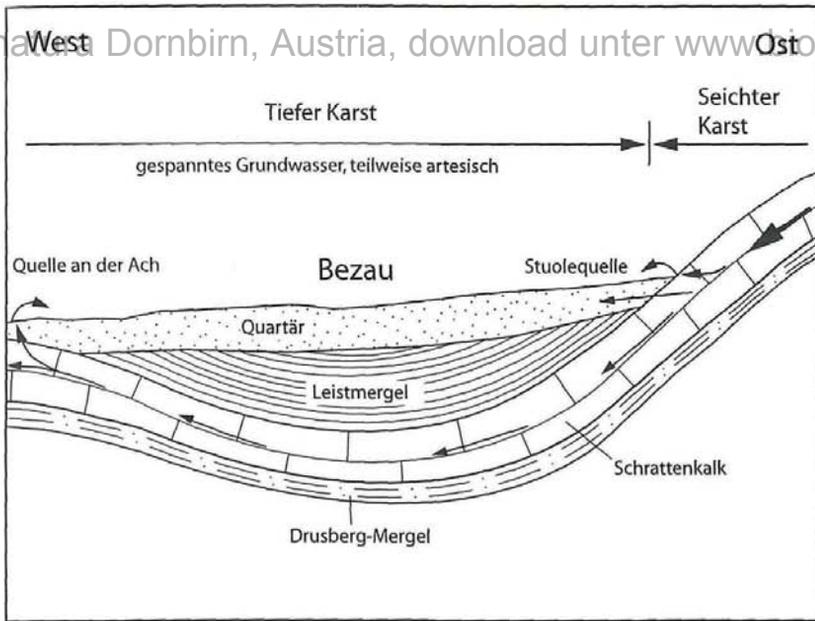


Abb. 28: Schematische Darstellung von seichtem und tiefem Karstabfluss sowie Infiltration in den Porengrundwasserleiter (nach NEUKUM 2001).

## 8.2 Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers

Die Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers können aus den Durchgangskurven des Markierungsversuchs berechnet werden. Aus dem Abstand zwischen Eingabestelle und Quelle und der Zeitdauer zwischen Eingabe und erstem Auftreten eines Markierungsstoffs ergibt sich die maximale Fließgeschwindigkeit (korrekt: Abstandsgeschwindigkeit). Die dominierende Fließgeschwindigkeit kann dagegen aus dem Maximum der Durchgangskurve berechnet werden (KÄSS 1992). Die ermittelten Fließgeschwindigkeiten im Gebiet Winterstaude sind gering bis mäßig hoch für ein alpines Karstsystem. Die meisten Fließpfade beinhalten Passagen in verschiedenen Grundwasserleitern und können daher nur bedingt zu Charakterisierung eines einzelnen Grundwasserleiters herangezogen werden.

Die Verbindung zwischen dem Stonger Moos (E1) und der Stuolequelle (QSt) folgt der Tiefenlinie der Grebentobel-Synklinale und ist daher charakteristisch für den seichten Karstabfluss im Schrättenkalk. Hier wurde eine maximale Fließgeschwindigkeit von 91 m/h und eine dominierende von 73 m/h berechnet (NEUKUM 2001).

Der tiefe Karstabfluss im Schrättenkalk unter dem Bezauer Talboden kann aus dem Vergleich der Durchgangskurven der Stuolequelle (seichter Karst) und der Quelle an der Ach (tiefer Karst) ermittelt werden. Die so berechnete maximale Fließgeschwindigkeit beträgt 22 m/h. Die dominierende Geschwindigkeit kann nicht zuverlässig bestimmt werden, da hierfür die Durchgangskurve an der Quelle an der Ach zu ungenau ist.

Die maximale bzw. dominierende Fließgeschwindigkeit zwischen dem Karstschacht im Örflla-Kalk (E2) und der Stuolequelle (QSt) beträgt 41 m/h bzw. 12 m/h. Da der Fließweg jedoch auch Passagen in den Drusberg-Mergeln und

im Schrattenkalk beinhaltet, charakterisieren diese Geschwindigkeiten das gesamte System und nicht allein den Örflla-Karstgrundwasserleiter

### 8.3 Einzugsgebiete der zur Trinkwasserversorgung von Bezau relevanten Quellen

#### *Kreuzbodenquelle*

Die Kreuzbodenquelle (QKz) wird von einem kleinen Porengrundwasserleiter gespeist, der einen sehr schnellen und quantitativ bedeutenden Zustrom von versickerndem Oberflächenwasser aus dem nahegelegenen Grebenbach erhält. Die direkte Infiltration von Niederschlägen und der laterale Zufluss von Hangwasser spielt eine geringere Rolle. Die Quelle erhält zwar keinen direkten Zufluss von Karstwasser, der Grebenbach entspringt aber in einer Karstquelle, die mit der Bachschwinde im Stonger Moos in Verbindung steht. Daher ist zumindest ein indirekter Einfluss von Karstwasser nachzuweisen. Das Einzugsgebiet der Kreuzbodenquelle beinhaltet daher das Grebentobel, das Stonger Moos und das Einzugsgebiet des Wildmoosbachs, der ja in den Grebenbach mündet.

#### *Stuolequelle*

Die Stuolequelle (QSt) und die benachbarten Quellen entspringen aus dem Schrattenkalk, erhalten aber auch Zuflüsse aus dem Karstgrundwasserleiter des Örflla-Kalks. Sie entwässern nahezu das gesamte Gebiet zwischen der Kammlinie des Gebirgszuges im Norden, dem Schreiberesattel im Osten und dem Höhenrücken Hälekopf-Luguntenkopf im Süden. Die Westgrenze des Einzugsgebietes konnte nicht genau ermittelt werden. Die Eingabestelle auf Sonderdach (E5) liegt sicher innerhalb des Einzugsgebietes, das Gebiet Bergvorsäß (E6) höchstwahrscheinlich außerhalb. Irgendwo dazwischen muss die Grenze verlaufen.

#### *Kressbachquelle*

Die Kressbachquelle (QKs) liegt zwar direkt am Fuß des Gebirgszuges der Winterstaude, dennoch hat keiner der Markierungsstoffe, die dort eingegeben wurden, die Quelle erreicht. Offensichtlich erhält die Quelle keinen direkten Zufluss von Karstwasser, sondern wird vorwiegend vom Porengrundwasserleiter des Bezauer Talraums gespeist. Da dieser jedoch Zuflüsse aus dem alpinen Karst erhält, ist zumindest ein indirekter, stark verzögerter Einfluss von Karstwasser zu vermuten. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

### 8.4 Vorschläge zum Schutz der Trinkwasserquellen

#### *Stuolequelle*

Die Stuolequelle (QSt) wird bisher nur dann zur Trinkwasserversorgung von Bezau herangezogen, wenn die Kreuzbodenquelle nicht genügend Wasser liefert. Das Wasser der Stuolequelle überschreitet oft deutlich alle bakteriologischen Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (BGBl 1998) und wird daher entkeimt, bevor es ins Leitungsnetz gespeist wird.

Das Einzugsgebiet der Stuolequelle ist sehr groß und beinhaltet das gesamte Gebiet zwischen dem Gebirgszug der Winterstaude und dem Berggraben Hälakopf-Luguntenkopf. Aus Gründen des Trinkwasserschutzes wäre es zwar wünschenswert, alle Schadstoffeinträge in diesem Gebiet zu vermeiden, aus ökonomischen Gründen ist dies jedoch nicht möglich. Schließlich befinden sich in diesem Gebiet zahlreiche Alpen und touristische Einrichtungen.

Falls die Stuolequelle weiterhin verwendet und ihre Qualität verbessert werden soll, kann die Vulnerabilitätskarte von WERZ (2001) helfen, einen Kompromiss zwischen Trinkwasserschutz auf der einen und Alpwirtschaft auf der anderen Seite zu finden. Innerhalb des Einzugsgebiets der Stuolequelle sollten Flächen mit erhöhter Vulnerabilität als Schutzzone II ausgewiesen werden und Bereiche geringerer Vulnerabilität als Schutzzone III. Bereiche mit extremer Vulnerabilität, insbesondere die Bachschwinde am Stonger Moos, sollten den größtmöglichen Schutz erhalten und als Schutzzone I ausgewiesen werden (Abb. 26).

Langfristig ist es aber vernünftiger, die Stuolequelle nicht mehr zu verwenden, sondern auf eine Quelle auszuweichen, die von Natur aus Trinkwasser in ausreichender Menge und guter Qualität fördert: die Kressbachquelle.

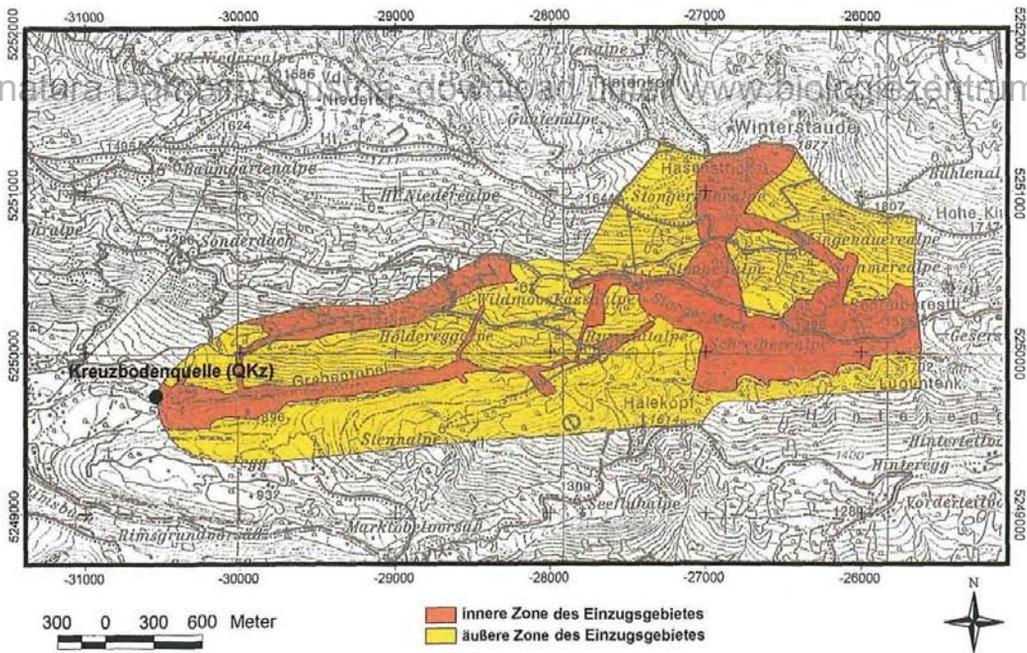
#### *Kreuzbodenquelle*

Die Kreuzbodenquelle (QKz) ist bisher die Hauptquelle zur Trinkwasserversorgung von Bezau. Sie ist hinsichtlich der Wassermenge und -qualität zwar eine gute, aber keine optimale Quelle: Zum einen ist ihre Schüttung in Trockenzeiten zu gering, zum anderen erfüllt sie trotz insgesamt guter Wasserqualität nicht alle bakteriologischen Grenzwerte, so dass ihr Quellwasser entkeimt werden muss.

Die Quelle fördert vor allem versickerndes Oberflächenwasser aus dem Grebenbach (Abb. 27). Ein möglicher Schadstoffeintrag in den Grebenbach würde daher innerhalb weniger Stunden zu einer Beeinträchtigung der Wasserqualität führen. Zum Schutz der Quelle sollten daher Schadstoffeinträge im Gebiet Grebentobel, Stonger Moos und Wildmoosbach möglichst vermieden werden. Hier kann eine innere und eine äußere Zone unterschieden werden: Als innere Zone werden diejenigen Flächen definiert, die direkt und oberflächlich zum Grebenbach hin entwässern; dies sind insbesondere Bereiche mit anstehendem Mergel. Flächen, die nur zu geringen Anteilen oder bei starkem Hochwasser beitragen, werden als äußere Zone bezeichnet; dies sind vor allem Bereiche mit anstehendem Kalkstein (Abb. 29).

Schadstoffeinträge in der inneren Zone erreichen die Quelle schneller und in höherer Konzentration, als solche in der äußeren Zone. Entsprechend der in Österreich geltenden Richtlinie zur Ausweisung von Schutz- und Schongebieten (ÖVGW 1995) könnte die innere Zone als Schutzzone II und die äußere als Schutzzone III ausgewiesen werden.

Schadstoffeinträge auf der Wiese, unter der die Sickerstränge der Kreuzbodenquelle verlegt sind, können bei Starkregen sofort ins Trinkwasser gelangen. Diese Wiese muss daher unbedingt geschützt werden und sollte zur Schutzzone I erklärt werden.



**Abb. 29:** Einzugsgebiet der Kreuzbodenquelle und Unterteilung in eine innere und äußere Zone (WERZ 2001).

### *Kressbachquelle*

Die Kressbachquelle (QKs) erscheint wegen ihrer hohen Schüttung und ihrer sehr guten Wasserqualität geeignet für die Trinkwasserversorgung von Bezau. Durch den Markierungsversuch konnte kein direkter Zustrom von Karstwasser aus dem Gebirgsmassiv der Winterstauden nachgewiesen werden. Vermutlich erhält diese Quelle ihr Wasser überwiegend oder ausschließlich aus dem Porengrundwasserleiter im Talraum von Bezau. Da dieser jedoch Zuflüsse aus dem alpinen Karst erhält, ist an der Kressbachquelle zumindest ein indirekter, zeitlich verzögerter Einfluss von Karstwasser zu vermuten. Hier sind weitere Untersuchungen zur Abgrenzung des Einzugsgebietes und der 60-Tagegrenze notwendig.

## **9. Danksagung**

Bei der Marktgemeinde Bezau und der Vorarlberger Naturschau bedanken wir uns für die Finanzierung dieses Projekts. Beim Ingenieurbüro RUDHARDT + GASSER, dem Umweltinstitut Vorarlberg und dem Landeswasserbauamt Bregenz bedanken wir uns für die konstruktive und erfreuliche Zusammenarbeit.

Besonders herzlich danken wir Herrn Fritz RÜF (Bezau) für die vielfältige und wertvolle Unterstützung und für das große Interesse an unserer Arbeit. Großer Dank gilt auch Frau Bürgermeisterin Anna FRANZ (Bezau), Herrn Dr. Walter WOHLGENANT und Herrn Dipl.-Ing. Markus SCHUPP (Umweltinstitut Vorarlberg), Herrn Dipl.-Ing. Michael GASSER (RUDHARDT + GASSER), Herrn Dr. Georg FRIEBE (Vorarlberger Naturschau) und Herrn Dipl.-Ing. Heinz GESSON (Landeswasserbauamt Bregenz).

Wir bedanken uns bei der Freiwilligen Feuerwehr Bezau für die Bereitstellung von Wasser für den Markierungsversuch, sowie bei allen Einheimischen, Kollegen und Freunden, die uns bei unserer Arbeit auf vielfältige Art und Weise mit Rat und Tat unterstützt haben.

## 10. Literatur

- RÄTZING, W. (1997): Kleines Alpen-Lexikon – Umwelt, Wirtschaft, Kultur; 320 S.; Beck, München.
- BGBL (1998): Verordnung: Qualität von Trinkwasser für den menschlichen Gebrauch in der Fassung vom 23. Juli 1998. – BGBL. II Nr. 235; Wien.
- BOLLINGER, D (1988): Die Entwicklung des distalen Osthelvetischen Schelfs im Barremian und Früh-Aptian (Drusberg-, Mittagsspitz- und Schratzenkalk-Fm.). – Mitteilungen aus dem geologischen Institut der Eidg. Technischen Hochschule der Universität Zürich, Neue Folge Nr. 259a: 136 S.; Zürich.
- BURMEISTER, K.H. (1982): Andelsbuch: Aus Geschichte und Gegenwart einer Bregenzerwälder Gemeinde: 327 S.; Andelsbuch.
- COST-Action 65 (1995): Karst groundwater protection. Final report-Europ. Commission, Report EUR 16547 EN, 446 S.; Brüssel-Luxemburg.
- DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHIEDER, N., NEALE, S., POPESCU, I.C. & ZWAHLEN, F. (2002): Main concepts of the European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. – *Hydrogeology Journal* (in Druck).
- EISBACHER, G.H. (1996): Einführung in die Tektonik, 2. Auflage: 374 S., 329 Abb.; Enke, Stuttgart.
- FÖLLMI, K.B., (1986): Die Garschella- und Seewer Kalk-Formation (Aptian-Santonian) im Vorarlberger Helvetikum und Ultrahelvetikum. – Mitteilungen aus dem geologischen Institut der Eidg. Technischen Hochschule und der Universität Zürich, Neue Folge Nr. 262, 391 S.; Zürich.
- FORD, D. & WILLIAMS, D.W. (1989): Karst Geomorphology and Hydrology. – 601 S.; Unwin Hyman, London, Boston, Sydney, Wellington.
- GOLDSCHIEDER, N. (1998): Hydrogeologische Untersuchungen im alpinen Karstgebiet Gottesacker und Schwarzwassertal (Allgäu/Vorarlberg). – *Vorarlberger Naturschau*, 4: 247-294; Dornbirn.
- 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., KLUTE, M., STURM, S. & HÖTZL, H. (2000): The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. – *Z. angew. Geol.*, 46 (2000) 3: 157-166, 9 Fig., 1 Tab.; Hannover.
- GOLDSCHIEDER, N., HÖTZL, H. & KÄSS, W. (2001): Comparative Tracer Test in the Alpine Karst System Hochiften-Gottesacker. – *Beitr. z. Hydrogeologie* 52: 12 p., 7 fig., 3 tab.; Graz (in press.).
- HÖLL, K. (1986): Wasser: Untersuchung, Beurteilung, Aufbereitung, Chemie, Bakteriologie, Virologie, Biologie. – 7.Aufl., 592 S.; Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- HÖTZL, H. (1996): Grundwasserschutz in Karstgebieten. – *Grundwasser*, 1/1: 5-11; Berlin, Heidelberg.
- KÄSS, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechniken. – *Lehrbuch der Hydrogeologie* Bd. 9.: 519 S.; Bornträger, Berlin, Stuttgart.

KRIEG, W. (1988): Karst und Höhlen in Vorarlberg – ein Überblick. – In: Karst und Höhlen in Vorarlberg. – Landesmuseumsverein, Karst- und Höhlenkundlicher Ausschuß: 7-8; Dornbirn.

MATTHEB, G. (1994): Die Beschaffenheit von Grundwasser (3. Ausg.). – Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 2.:499 S.; Borntäger, Berlin, Stuttgart.

NEUKUM (2001): Tektonik und Karstentwässerung im Gebirgsmassiv der Winterstaude (Marktgemeinde Bezau, Vorarlberg, Österreich). – Diplomarbeit Univ. Karlsruhe: 104 S., 66 Abb., 9 Tab., 2 Karten, 1 Profiltafel; Karlsruhe (unveröff.).

ORTH, J. P. (1992): Falten- und Schuppenstrukturen als Leitelemente der Karstentwässerung in den Bayerischen Alpen. – Laichinger Höhlenfreund, 27(1): 23–39, 2 Abb.; Laichingen.

OBERHAUSER, R. (1951): Zur Geologie des Gebietes zwischen Canisfluh und Hohem Ifen (Bregenzerwald). – Dissertation Univ. Innsbruck: 45 S.; Innsbruck.

OBERHAUSER, R (1995): Zur Geologie von Bezau. In: MEUSBURGER W. (1995): Bezau, Geschichte, Gesellschaft, Kultur: 304 S.; Bezau.

RICHTER, M. (1978): Vorarlberger Alpen. – Sammlung geologischer Führer Bd. 49; Borntaeger, Stuttgart.

SCHOLZ, H. (1995): Bau und Werden der Allgäuer Landschaft. – 2. Auflage: X + 305 S., 134 Abb., 47 Taf.; Schweizerbart, Stuttgart.

SCHWERD, K (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000. – Bayerisches Geologisches Landesamt: 329 S.; München.

SEIJMONSBERGEN, A.C. & VAN WESTEN, C.J. (1987): Geomorphological-, geotechnical- and natural hazard maps of the 'Hintere Bregenzerwald' area (Vorarlberg, Austria). Part I: Text. – Report, Alpine Geomorphology Research Group, University of Amsterdam: 176 S.; Amsterdam.

TRIMMEL, H. (Red.) (1998): Die Karstlandschaften der österreichischen Alpen und der Schutz ihres Lebensraumes und ihrer natürlichen Ressourcen. – Fachausschuß Karst von CIPRA-Österreich: 119 S.; Wien.

WERZ, H. (2001): GIS gestützte Vulnerabilitätskartierung und Vorschläge zur Ausweisung von Trinkwasserschutz zonen für die Gemeinde Bezau. – Diplomarbeit Univ. Karlsruhe: 120 S., 46 Abb., 14 Tab., 20 Karten im Text, 2 Karten u. 1 Profiltafel als Anlage; Karlsruhe (unveröff.).

WYSSLING, G. (1986): Der frühkretazische Schelf in Vorarlberg und im Allgäu – Stratigraphie, Sedimentologie und Paläogeographie. – Jb. Geol. B.-Anst., 129 (1): 161-265, 50 Abb., 1 Tab.; Wien.

ZACHER, W. (1973): Das Helvetikum zwischen Rhein und Iller (Allgäu-Vorarlberg). Tektonische, paläogeographische und sedimentologische Untersuchungen. – Geotekt. Forsch., 44: 1-74, 12 Abb., 6 Tab., 4 Taf., 3 Beil. (Profilsereien), 1 Anlage (geol. Kt. u. Profiltaf.); Stuttgart.

#### *Anschrift der Autoren*

*Dipl.Geol. Nico Goldscheider*

*Dipl.Geol. Christoph Neukum*

*Dipl.Geol. Heike Werz*

*AGK Angewandte Geologie Karlsruhe*

*Hydrogeologie Prof. Dr. Hötzl*

*Universität Karlsruhe*

*Kaiserstrasse 12*

*D-76128 Karlsruhe*

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Vorarlberger Naturschau - Forschen und Entdecken](#)

Jahr/Year: 2002

Band/Volume: [11](#)

Autor(en)/Author(s): Goldscheider Nico, Neukum Christoph, Werz Heike

Artikel/Article: [Hydrogeologie und Trinkwasserschutz im alpinen Karstsystem der Winterstaude \(Marktgemeinde Bezau, Bregenzerwald, Vorarlberg, Österreich\). 9-58](#)