

KARSTVULNERABILITÄT IN DER HALLSTÄTTER ZONE VON ISCHL-AUSSEE, NÖRDLICHE KALKALPEN (OBERÖSTERREICH, STEIERMARK)

Hans Jörg Laimer⁽¹⁾ und Josef-Michael Schramm⁽²⁾

¹⁾ joerg.laimer@alpinfra.com, ALP-infra Engineering + Consulting GmbH, Sterneckstraße 55/5/A8, A-5020 Salzburg;

²⁾ josef-michael.schramm@sbg.ac.at, Universität Salzburg, FB Geographie, Geologie und Mineralogie, Abteilung Regionale und Angewandte Geologie, Hellbrunnerstraße 34, A-5020 Salzburg

ZUSAMMENFASSUNG/ABSTRACT

VURAAS (Vulnerabilitäts- und Risikoanalyse alpiner Aquifersysteme), ein in Österreich entwickeltes Konzept zur Quantifizierung der Karstvulnerabilität wird methodisch erläutert und am Fallbeispiel Ischl-Aussee im Karst der oberösterreichisch/steirischen Kalkvoralpen (Hallstätter Zone des Inneren Salzkammerguts) angewendet. Dieses neue Bewertungsschema misst der Infiltration des Wassers größere Bedeutung zu als dem Input bzw. der Exfiltration, was sich als sehr anwendungsorientiert und flexibel erwiesen hat.

Als Ergebnis präsentiert sich eine Vulnerabilitätskarte mit drei unterschiedlichen Klassen. Die stark verkarsteten Kalkformationen mit geringer Speicherkapazität sind großteils sehr vulnerabel. Schwächer verkarstete Kalke und Dolomite mit gut entwickelten Böden fallen in die Klasse 2 (hoch vulnerabel). Gebiete, die vorwiegend aus Mergeln und Evaporiten aufgebaut sind und zusätzlich Moränen- und Lehmbedeckung aufweisen, werden als mittel vulnerabel evaluiert. Eine geringe bzw. sehr geringe Vulnerabilität konnte in keinem Bereich klassifiziert werden, was bei dem komplizierten geologischen Bau der Hallstätter Zone mit ihren geringmächtigen Kalkfolgen auf mergeligem Unterbau nicht überrascht. Somit ist die Verschmutzungsempfindlichkeit der untersuchten Karbonataquifere meist hoch.

This paper deals with analysis of karst vulnerability based on VURAAS (vulnerability and risk assessment for alpine aquifer systems), a specific method developed in Austria and verified as case study in the Northern Calcareous Alps area of Ischl-Aussee (Salzkammergut, Upper Austria/Styria). The new evaluation model, as a criterion of assessment in which more significance is attached to infiltration rather than to input and exfiltration has thus been proved to be highly flexible and applicable.

The resulting vulnerability map basically presents three categories: Karstified limestone formations with poor storage capacity can be classified as extremely vulnerable. Less karstic limestone and dolomite formations covered by richer developed soil formation can be evaluated as high vulnerable. Areas generally consisting of marls and evaporites in the underground and surface formations of till and lime-based clay can be classed as having a moderate vulnerability. Lower classes do not occur due to the relative thinness of the strata overlay and to the meagre storage capacities.

I. EINFÜHRUNG

Viele Karstgebiete der Kalkvoralpen dienen heute u. a. der kommunalen Wasserversorgung. Wiederholt auftretende Wasserverunreinigungen zeigen die Sensibilität gegenüber äußeren Einwirkungen deutlich auf. Karstgebirge gelten auf Grund der schwierigen Bestimmung des hydrographischen Einzugsgebietes, großer Fließgeschwindigkeiten im Aquifer und vielfältiger Infiltrationsbedingungen als besonders vulnerabel (verletzbar) gegenüber der anthropogenen Beeinflussung. Mit einer neuen hydrogeologischen Methode, der Beurteilung der Karstvulnerabilität, könnten zukünftige Nutzungskonflikte zwischen Wasserversorgung, mineralischer Rohstoffversorgung, Land- und Forstwirtschaft, Siedlungs-, Verkehrs- und Tourismus-Interessen vermieden werden. Das sogenannte VURAAS-Konzept (Vulnerabilitäts- und Risikoanalyse alpiner Aquifersysteme) wurde von Hartmut Zojer & Cichocki am Joanneum in Graz entwickelt und nach einem erfolgreichen Pilotprojekt am Kärntner Nassfeld vom Erstautor (Laimer 2004) auf den nordalpinen Karst übertragen. Ziel dieser Untersuchung war eine GIS-basierte Erfassung der Vulnerabilität und ihre kartographische Darstellung in fünf Vulnerabilitätsklassen für ein rund 80 km² großes Arbeitsgebiet.

II. KONZEPT UND METHODIK

Kernfaktoren [P], [I] und [E]

Mit einer hydrogeologischen und karstmorphologischen Systembeschreibung wird die Datenbasis für die Vulne-

abilitätsbewertung bereitgestellt. Die drei Kernfaktoren Input [P], Infiltration [I] und Exfiltration [E] ermöglichen mit dem VURAAS-Ansatz nach Cichocki (2003) die modellhafte Beschreibung des Wasser- und Stofftransportes. Zur Beurteilung von [P], [I] und [E] werden zahlreiche Bewertungsparameter herangezogen (Abb. 1).



Abb. 1: VURAAS-Bewertungsschema (modifiziert nach Hartmut Zojer 2003)

Im Kernfaktor Input [P] wird der klimatische Einfluss auf die Vulnerabilität berücksichtigt. Die Parameter der Wasserhaushaltsgleichung quantifizieren jene Wassermenge, die in das Karstsystem infiltriert. Der Input beinhaltet sämtliche Größen der angeführten Gleichung und beeinflusst als Eingangsgröße die übrigen Kernfaktoren Infiltration und Exfiltration. Da größere Wassermengen die Gefahr eines Schadstoffeintrags erhöhen, entspricht ein höherer Input gleichzeitig einer höheren Vulnerabilität.

Die Infiltration [I] dient zur indirekten Bestimmung der Verweilzeit des Wassers innerhalb der Deckschichten. Je länger das infiltrierende Wasser im Aquifer verweilt, desto weniger vulnerabel ist dieser gegenüber Schadstoffeinträgen. Aus der Verschneidung und Generalisierung der drei Layer „Ungesättigte Zone“, „Art der Infiltration“ und „Grundwasserneubildung“ resultiert eine Karte für die Infiltration, welche mittels der Methode VURAAS bereits eine sehr hohe Aussagekraft bezüglich der Karstvulnerabilität besitzt.

Der Kernfaktor Exfiltration [E] wird durch Multiplikation der Teilfaktoren „Ganglinienverlauf“, „Speicherkoefizient“ und „Verweilzeit“ gebildet. Er dient gemeinsam mit dem Kernfaktor Input zur Validierung der Infiltrationskarte. Die drei Parameter beziehen sich auf einzelne Quellen, weshalb eine flächenhafte Darstellung ohne genaue Kenntnis der Quelleinzugsgebiete nur sehr eingeschränkt möglich ist.

Bewertung und Gewichtung der Faktoren

Alle Teilfaktoren werden in fünf Klassen unterteilt und unterliegen einer Punktevergabe (rating). Abhängig von ihrer Bedeutung für die Karstvulnerabilität werden sie zusätzlich untereinander gewichtet (weighting). Für jeden Teilfaktor wird mittels GIS-Technik jeweils ein Layer mit unterschiedlich vulnerablen Flächen erstellt. Aus der Kombination der einzelnen Bewertungsparameter ergibt sich pro Kernfaktor ein Layer, wobei der Algorithmus zur Vereinheitlichung variiert. Aus dem Verschnitt der drei generalisierten Kernfaktoren resultiert schließlich die Vulnerabilitätskarte.

Der Wert für jeden Kernfaktor wird um den Wert 1 als Mittelwert generalisiert. Ein höherer Wert (>1) weist auf eine geringere Vulnerabilität hin und umgekehrt bedeutet eine niedrige Punktezahl (<1) eine größere Verletzbarkeit des Aquifers. Der Mittelwert 1 induziert im Bewertungsschema einerseits eine mittlere Vulnerabilität, andererseits wird er herangezogen, wenn ein Parameter nicht gemessen werden kann oder die Datengrundlage Mängel aufweist. Durch dieses Verfahren wird das Konzept VURAAS in der praktischen Anwendung äußerst flexibel und bleibt selbst bei unvollständigen Eingangsdaten anwendbar.

Die österreichische Methode VURAAS unterscheidet sich von anderen Konzepten der Vulnerabilitätskartierung – wie z. B. EPIK (Doerflinger, Zwahlen 1998) oder PI-Methode (Goldscheider et al. 2000) – in der detaillierten Bewertung der Infiltration und Exfiltration, wodurch die Karstwasserdynamik besser und objektiver beschrieben werden kann. Die ungesättigte Zone wird in VURAAS als Summe der schützenden Schichten der Grundwasserüberdeckung aufgefasst. Die aufwendige Kartierung und Beurteilung der einfließenden Faktoren – „Boden“, „Lockergestein“, „Festgestein“ und „Verkarstung/Klüftung“ – bilden den Hauptteil der Geländearbeit. Verkarstungsgrad und Trennflächen bestimmen die Infiltrationsgeschwindigkeit und sind innerhalb des Faktors „Ungesättigte Zone“ (UZ) am stärksten gewichtet. Die Klassifizierung der Locker- und Festgesteine folgt den Vorgaben von Goldscheider et al. (2000), die Gewichtung ist aber den Verhältnissen im alpinen Karst angepasst. So werden Boden und Lockergesteine höher gewichtet als die lithologischen Einheiten, und die Mächtigkeiten jeweils in Abhängigkeit vom behandelten Faktor bewertet.

Auf das Gesamtergebnis hat der Kernfaktor Infiltration den größten Einfluss, da bei der Erfassung seiner Bewertungsparameter (vor allem im Faktor „Ungesättigte Zone“) die größte Objektivität erreicht wird. Diese können im Gegensatz zu jenen der Exfiltration genauer und flächendeckend kartiert werden und im Vergleich mit dem Kernfaktor Input sind die verschiedenen Layer der Infiltration ohne größere Dateninterpolationen darstellbar. Die Infiltration wird als Ausgangsklasse ([I]-Klasse) stärker gewichtet als Input und Exfiltration, deren Summe die Deltaklasse (Δ -Klasse) bildet. Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$\text{Vulnerabilität} = [\text{I}]\text{-Klasse} + \Delta\text{-Klasse} (\Delta = \sum ([\text{P}] + [\text{E}]))$$

III. PHYSIOGEOGRAPHISCHE CHARAKTERISIERUNG DES PROJEKTGEBIETS

Das 81,3 km² große Untersuchungsgebiet liegt im zentralen Salzkammergut in den Gemeindegebieten von Bad Ischl, Bad Goisern (Oberösterreich) und Altaussee (Steiermark). Es ist durch alpines Klima gekennzeichnet. Ozeanische W- bis NW-Strömungen und die Stauwirkung des Gebirges charakterisieren den nordalpinen Raum (nördliche Randstaulage) und bewirken zu allen Jahreszeiten ausgiebige Niederschläge. Das Gebiet wird intensiv forstwirtschaftlich bzw. touristisch genutzt. Die Salzbergbaue Bad Ischl und Altaussee beeinflussen die Hydrogeologie maßgeblich. Die drei Gemeinden beziehen ihr Trinkwasser teilweise aus diesem Einzugsgebiet.

Charakteristische Bodentypen des Untersuchungsgebiets sind – den geologischen und geomorphologischen Gegebenheiten entsprechend – Varianten der Rendzina-Serie, Kalklehm, hydromorphe Böden und Moore. Bei der Betrachtung der Bodenverbreitung kommt der alpinen Geländemorphologie eine besondere Bedeutung zu, da sie Mikroklima und Erosionsprozesse maßgeblich beeinflusst. Zwar variieren aufgrund der morphologischen Voraussetzungen Bodentyp und Bodenmächtigkeit auch auf ähnlichem Ausgangsgestein kleinräumig sehr stark, doch treten auf mergelig-sandigem Substrat relativ mächtige Bodenbildungen mit hoher Lehmkomponente auf. Bei den Rendzinen ist die Pedogenese ausschließlich auf die spärliche Humusakkumulation beschränkt. Die Bedeutung des Bodens als Wasserspeicher wird im VURAAS-Konzept über seine nutzbare Feldkapazität (nFK) quantifiziert.

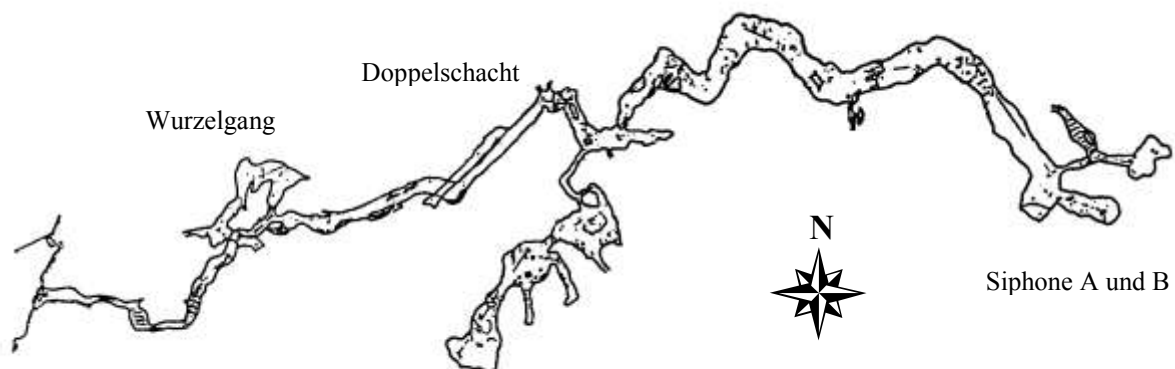


Abb. 2: Grundriss des Höllenlochs (Anzenberg, 1612/001); modifiziert nach LVHOÖ, Maßstab ca. 1:2100



Abb. 3: Großes Knerzenloch (Höherstein, 1615/007) bei winterlichem Niederwasser (links) und Wasserloch (Tauern, 1614/005) bei sommerlichem Hochwasser (rechts). Fotos: H. J. Laimer

IV. GEOLOGIE UND HYDROGEOLOGIE

Das Projektgebiet umfasst permische Evaporite, die Gesamtabfolge der Triasentwicklung in Hallstätter Fazies, Bereiche der Dachsteinkalkfazies, sowie Jura- und Unterkreidesedimente. Karsthydrogeologisch können zwei Abschnitte unterschieden werden, wobei Gebiete mit seichtem Karst überwiegen. Fast in der gesamten Ischler – Ausseer Hallstätter Zone liegen verkarstungsfähige jurassische und triassische Kalke über wasserstauenden Mergel- und Tongesteinen (Abb. 4). Da letztere hoch über der Vorflut ausstreichen, herrschen in weiten Bereichen die Bedingungen eines seichten Karsts vor. In den über der absoluten Höhe der Quellaustritte liegenden Aquiferen dominiert daher eine aktive Speicherung, wie sie Hans Zojer (1978) auch für das angrenzende Tote Gebirge beschreibt.

Im Zentral- und S-Teil des Arbeitsgebiets stellen die Zlambachschiechten, im N, W und E die Allgäu-Formation den wichtigsten Stauer dar. Am Ischler Salzberg wirkt das Haselgebirge als bedeutende Aquitarde. Bei Wasseraustritten aus den stauenden Gesteinen handelt es sich meist um Oberflächenwasser und oberflächennahe Sickerwässer mit äußerst geringer Schüttung. Größere Quellen sind an Karstareale, Störungen oder tiefreichende Massenbewegungen gebunden, da diese eine hydraulische Wegsamkeit auch über stauende Schichtglieder ermöglichen. Neben Gebieten, in denen Kalke und Dolomite im ursprünglichen sedimentären Verband vorliegen, finden sich im Untersuchungsgebiet unzählige isolierte Kalkschollen. Diese sind durch komplexe tektonische Vorgänge (Mandl 1982) bzw. junge Massenbewegungen entstanden und meist vollständig aus dem ursprünglichen Umfeld gelöst. Die vorwiegend triassischen Kalkschollen stecken in den unterlagernden Zlambachschiechten und der Allgäu-Formation, sind bis zu mehrere Hektar groß und unterschiedlich stark verkarstet.

Abflusssdynamik und Hydrochemie der Quellen in der Hallstätter Zone sind durch die sehr abwechslungsreiche Lithologie stark geprägt. Im Untersuchungsgebiet reicht die für karsthydrogeologische Arbeiten übliche Einteilung in Kalk-, Dolomit- und Mischwässer nicht aus. Der kleinräumige lithologische Wechsel von Karstgesteinen und nicht verkarstungsfähigen Gesteinen führt gemeinsam mit der komplizierten Tektonik zu einer heterogenen Zusammensetzung der Quellwässer, sodass eine separate Ausscheidung von Kalk-Sonderwässern, sulfatreichen Kalk-Wässern, sowie Chlorid- und Gips-Wässern notwendig erscheint (Abb. 5).

Von Oktober 2002 bis Oktober 2003 wurden an 20 Quellen und 3 Stollenwässern monatlich Schüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit gemessen. Die Beobachtung dieser 3 Feldparameter ist unerlässlich, um Aussagen über den Quelltyp, die Dynamik von Quellen, das Speichervermögen und den Entwässerungsmechanismus des Aquifers treffen zu können. Der Jahresgang von Temperatur und Leitfähigkeit ermöglicht Aussagen über die Beschaffenheit des Einzugsgebiets (seicht, tief) und den Einfluss der Schneeschmelze auf die Abflussdynamik. Die monatliche Schüttung muss, da an keinem Gewässer des Untersuchungsgebiets eine Abflussmessstelle eingerichtet ist, zur Interpretation der Speicherkapazität herangezogen werden. Der Vergleich einzelner Parameter aller Wasseraustritte erleichtert eine Beurteilung des Einzugsgebiets und eine Unterscheidung verschiedener Quelltypen.

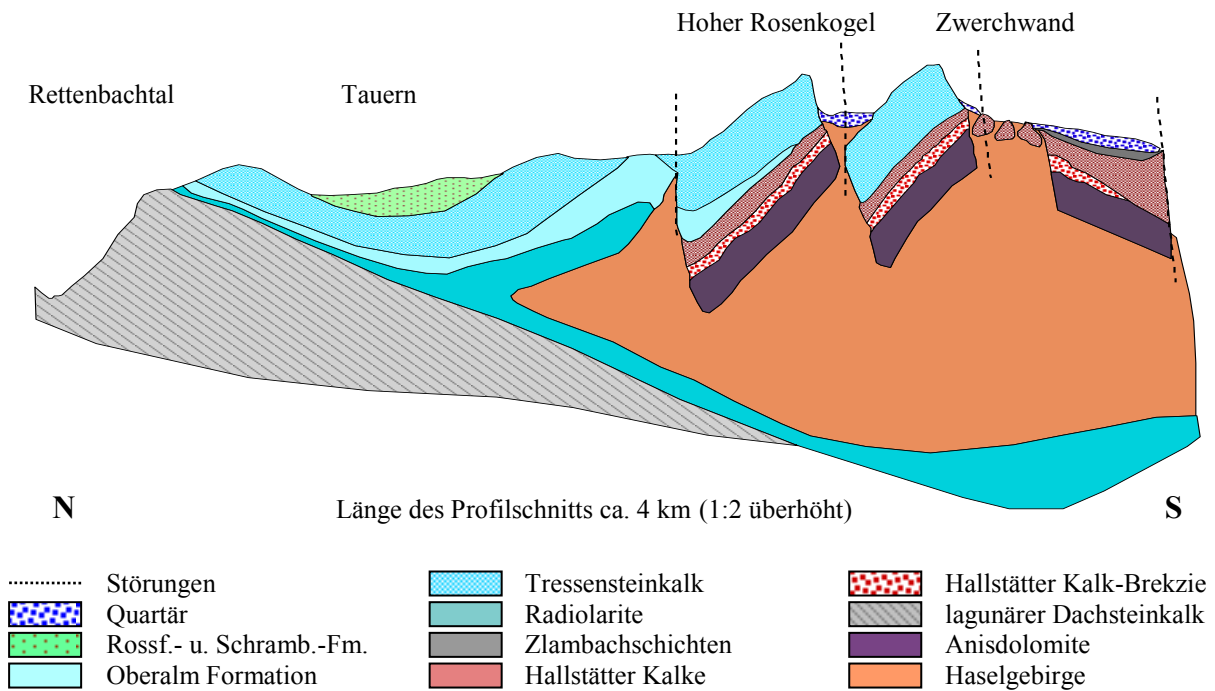


Abb. 4: Profil durch den N-Teil der Hallstätter Zone Ischl-Aussee (modifiziert nach Mandl 1984).

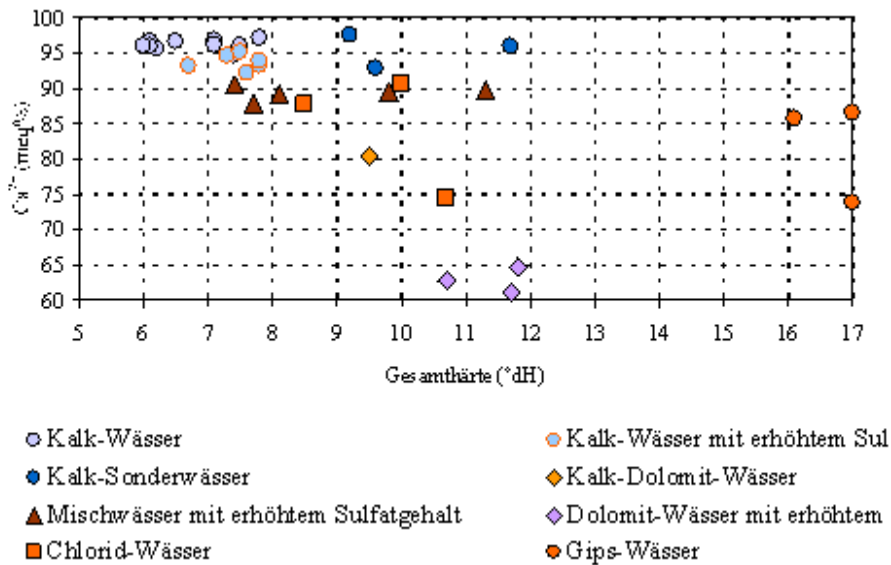


Abb. 5: Gegenüberstellung von Ca^{2+} -Anteil an der Gesamthärte (meq%) und Gesamthärte (°dH).

Alle Ganglinien weisen das Schüttungs-Maximum in den niederschlagsreichen Herbstmonaten Oktober und November 2002 auf. Bei den meisten dauerbeobachteten Quellen erfolgt auch während der Schneeschmelze ein bedeutender Schüttungsanstieg. Je nach Exposition und Höhenlage des Einzugsgebiets findet Schüttungsanstieg im März, April oder Mai statt. Schwach ausgeprägt ist der frühjährliche Anstieg nur bei den Altausseer Stollenwässern. Kaum bemerkbar macht sich die Schneeschmelze bei den Dolomit-Quellen. Eine dritte Schüttungsspitze ergibt sich beim überwiegenden Teil der Quellen durch ein schwaches Hochwasser im Oktober 2003. Dieses wirkte sich bei den Wasseraustritten um den Sandling sehr abgeschwächt aus, da zum Zeitpunkt der Messung die Schneegrenze bis auf 1400 m SH herabsank.

Die Dynamik der wasserwirtschaftlich bedeutenden Karst- und Höhlenquellen lässt sich nur begrenzt mit dem Piston-flow-Modell charakterisieren: meistens verdeutlichen sehr hohe Schwankungsziffern der Schüttung und rasche hydrochemische Reaktion (starker Abfall der Leitfähigkeit bei Hochwasser) das ausgeprägte Reagieren auf Witterungseinflüsse (Abb. 6).

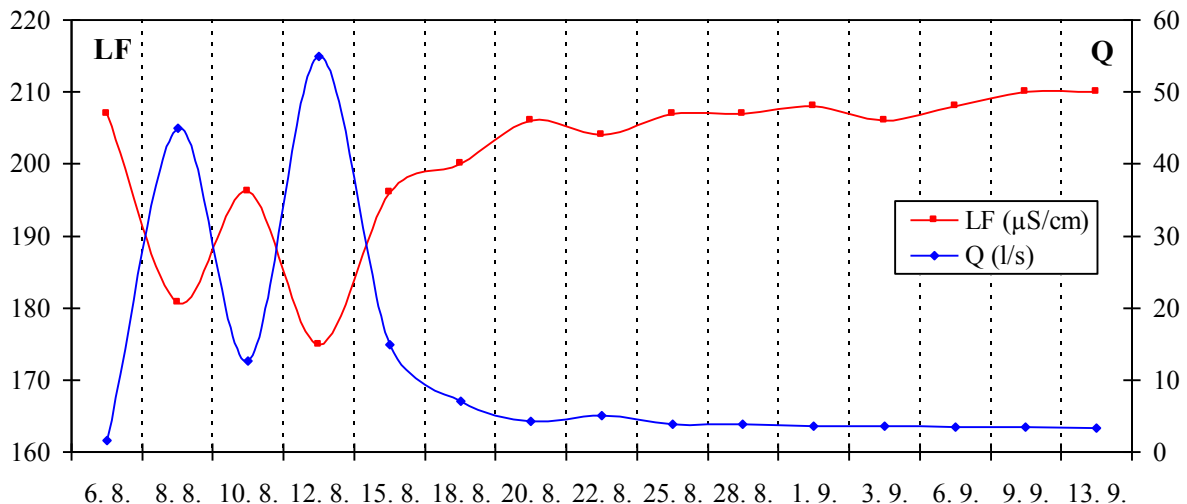


Abb. 6: Hochwasser-Ereignisse am Grabenbachbründl (Rettenbachtal) im August 2002.

Die Jahresganglinien der Schüttung und daraus berechnete Q_{max}/Q_{min} -Verhältnisse über 100 lassen zudem auf äußerst geringe Wasserspeicherfähigkeit und bedeutenden Rezentwasseranteil schließen. Die starke Außenbeeinflussung resultiert aus der fehlenden Retention im Karstaquifer und äußerst geringen 2H - und ^{18}O -Isotopengehalten. In der Mineralisation der Wässer äußert sich dieser Umstand in einem eindeutig gegensätzlichen Verlauf von Schüttungs- und Leitfähigkeitsganglinien.

V. VURAAS-ANWENDUNG UND ERGEBNISSE

Zur Anwendung von VURAAS wurden folgende Subfaktoren erfasst und kartiert: Geologie (Schichtfolge, Strukturen), Geomorphologie (Karst, Massenbewegungen, Infiltrationsart), Boden (Typ, Mächtigkeit, Feldkapazität), Hydrologie (Niederschlag, Verdunstung, Oberflächenabfluss) und Hydrogeologie (Quellkataster: Anhang I, Hydrochemie, Isotopenhydrologie, Ganglinien, Grundwasserneubildung, Speicherung, Verweilzeit, Dauerbeobachtung von 24 Wässern).

Die einzelnen Parameter wurden nach der Aufnahme im Gelände (Maßstab 1:5000) mittels GIS-Software ARC VIEW 3.1 digitalisiert und zu Layers weiter entwickelt. Die Verschneidung („Intersection“) der Ausgangslayer erfolgte mittels ARC GIS. Die Ausgangslayer wurden nach dem VURAAS-Konzept bewertet, nach unterschiedlichen Algorithmen zu Kombinationslayers berechnet und schließlich mittels GIS zu einer Vulnerabilitätskarte verschnitten. Die Ergebnisse für die einzelnen Layer werden im Folgenden wiedergegeben.

Kernfaktor Input

Der für das Arbeitsgebiet berechnete Gebietsniederschlag beträgt 1738 mm. Ein Flächenanteil von 86,2 % weist Niederschläge zwischen 1600 – 1900 mm auf und nur oberhalb von 1600 m SH werden 2000 mm überschritten. Bis zu dieser Seehöhe herrscht eine Verdunstung von über 20 % vor. Die Berechnung des Oberflächenabflussan-

teils erfolgt über 7 unterschiedliche Landnutzungsklassen und diesen zugeordnete Abflusskoeffizienten. Er liegt im sehr stark bewaldeten Untersuchungsgebiet meist zwischen 32,2 - 37,7 % des Niederschlags und steigt nur in den dicht besiedelten Talräumen über 40 % an. Da Rückhalt und Aufbrauch des Wassers (z. B. durch Kunstschnee-Produktion oder Trinkwasser-Reservoirs) 10 % des Abflusses nicht überschreiten, erhält der Faktor einheitlich den Wert 1 (vgl. Cichocki 2003 und Hartmut Zojer 2003).

Für die Karte des Inputs ergeben sich nur zwei Vulnerabilitätsklassen, wobei der überwiegende Teil des Arbeitsgebiets der Klasse 3 (Wert 1) zugeordnet werden kann. Innerhalb der mittleren Klasse streuen die Punkte stark, beispielsweise liegt das über 1600 m SH situierte Sandlingplateau auf Grund höheren Niederschlags und geringerer Verdunstung schon an der Grenze zur Klasse 2. In den dicht besiedelten Talräumen folgt aus höherem Oberflächenabfluss die Klasse 4.

Kernfaktor Infiltration

Zur Beurteilung des Subfaktors „Festgestein“ wurde auf die umfangreiche Literatur zur regionalen Geologie des Projektgebietes zurückgegriffen. Die Mächtigkeit von Lockersedimenten konnte an Bach- und Straßeneinschnitten direkt bestimmt werden und wurde sonst über Morphologie und Morphogenese abgeschätzt. Die Bodenmächtigkeiten wurden aus der österreichischen Bodenkarte bzw. den bundesforstlichen Operaten übernommen und im Gelände mit Profilgrabungen und Pürckhauerbohrungen überprüft. Nach der Generalisierung der Gesamtpunktzahl der ungesättigten Zone zeigt der UZ-Layer alle 5 möglichen Klassen. Aus Mergeln aufgebaute Bereiche weisen geringe Vulnerabilität auf, Areale mit mächtiger Lockergesteinsdecke sogar eine sehr geringe. Sämtliche Kalke und Dolomite erreichen je nach Verkarstungsgrad, Lockergesteins- und Bodenbedeckung geringe bis sehr geringe Punktezahlen.

Die Art der Infiltration trägt der hydrogeologischen Bedeutung von Karsthohlformen als Stellen punktueller Infiltration Rechnung. Über Dolinen, Schächte und Schwinden kann bei gleichzeitiger Ausschaltung der Schutzfunktion der ungesättigten Zone konzentrierter Input erfolgen. Im Untersuchungsgebiet überwiegt zwar die flächenhafte Infiltration, doch vor allem auf den Kalkplateaus wurden größere Areale mit punktueller Infiltration ausgewiesen. Die Einzugsgebiete einzelner wasserführender Hohlformen wurden mit einem entsprechend gewichteten Puffer versehen. Lineare Infiltration kann nur an Bächen angenommen werden, welche die quartären Talfüllungen mit Uferfiltrat-Wässern alimentieren.

Über den Faktor „Grundwasserneubildung“ wird der Wasser- und Stofftransport im Karstsystem mit vorwiegend hydrologischen Methoden charakterisiert. Er bildet sich aus der Summe der Subfaktoren „Oberirdischer Rückhalt“, Verhältnis von „Quelldichte zu Schüttung“ und „Speicherfunktion“. Betrachtet man ausschließlich den Layer für die Grundwasserneubildung, so ergibt sich für das gesamte Arbeitsgebiet eine mittlere bis hohe Vulnerabilität. Der geringe Schutzfaktor geht hauptsächlich auf die mittlere und geringe Speicherkapazität zurück, die innerhalb des Faktors „Grundwasserneubildung“ am stärksten gewichtet ist. Die beiden übrigen Subfaktoren bestätigen das Ergebnis, da der oberirdische Rückhalt in weiten Bereichen gering bzw. mittelmäßig bleibt und nur ein kleines Einzugsgebiet mit hoher Quelldichte bei gleichzeitig geringer Schüttung vorliegt.

Während in den Layern „Ungesättigte Zone“ und „Art der Infiltration“ noch alle möglichen Klassen vertreten sind, so ergeben sich nach der Multiplikation mit der „Grundwasserneubildung“ nur mehr drei Klassen. Alle Gebiete mit sehr geringer und geringer Vulnerabilität (Mergelareale mit entsprechender Lockergesteins- und Bodenbedeckung) werden um 1 – 2 Klassen auf mittlere Vulnerabilität abgewertet. Einige Karstgebiete, die vor der Bewertung der Grundwasserneubildung noch hohe Vulnerabilität zeigten, fallen in der Infiltrationskarte in die Klasse mit sehr hoher Vulnerabilität ab.

Kernfaktor Exfiltration

Ein konstanter Ganglinienverlauf wird allgemein als Indiz für eine geringe Vulnerabilität betrachtet. Zur Bewertung des Ganglinienverlaufs werden wie bei Cichocki (2003) auch die Variationskoeffizienten der Leitfähigkeit herangezogen. Demgegenüber sind Temperaturverlaufslinien auf Grund der mancherorts angetroffenen oberflächennahen Wasserwege, die meist nur kleine Teile eines Quelleinzugsgebiets repräsentieren, schlechter geeignet. Der Variationskoeffizient der Leitfähigkeit wurde für die dauerbeobachteten Wasseraustritte und für jene Quellen berechnet, die öfter als viermal beprobt wurden. Die Hydrogramme der Dauerbeobachtung und der Hochwasser-Ereignisse werden ebenfalls miteinbezogen, zumal sie indirekte Hinweise auf den Entwicklungsgrad des Karstsystems liefern.

Da die zur Bestimmung des Speicherwertes α herangezogenen Daten äußerst mangelhaft sind, musste für das gesamte Arbeitsgebiet der neutrale Wert 1 angenommen werden. Der versuchsweise in die Berechnung der Exfiltration miteinbezogene Layer des Speicherkoeffizienten brachte im Endergebnis keine Veränderung.

Die zur Bestimmung der Verweilzeit von Karstwässern übliche Analyse des radioaktiven Umweltsotops Tritium (^3H) konnte für diese Arbeit nicht durchgeführt werden. Für den seichten Karst des Untersuchungsgebiets wird die Verweilzeit auf den Bereich 1/12 – 1 Jahr geschätzt. In den Kalkarealen beträgt sie sogar weniger als ein Monat.

Wie die Exfiltrationskarte bei Cichocki (2003) und Hartmut Zojer (2003) weist auch jene des Untersuchungsgebiets nur die mittleren Vulnerabilitätsklassen auf. Da der Koeffizient α mit 1 angenommen wurde, überwiegt ein mittlerer Wert für die Exfiltration.

Endergebnis

Das Endergebnis der Vulnerabilitätsbewertung (Anhang II) entspricht exakt der Karte der Infiltration. Da die Deltaklasse nur mittlere Werte erreicht, kann sie die durch die [I]-Klasse determinierte Vulnerabilität nicht mehr verändern. Dieser Fall trat auch im Testgebiet Nassfeld ein. Im Unterschied zum Kärntner Testgebiet ergeben sich im Arbeitsgebiet aber lediglich drei Vulnerabilitätsklassen.

Sehr hohe Vulnerabilität trifft auf die meisten großen Schollen aus Oberjurakalk und Hallstätter Kalk zu. Diese sind durch hohen Verkarstungsgrad, fehlende Lockergesteinsdecke, seicht- bis mittelgründige Rendzina-Böden sowie schlechte Speicherfähigkeit gekennzeichnet. In den Kleineinzugsgebieten punktueller Infiltrationsstellen kann sich selbst auf stauenden Schichtgliedern eine sehr hohe Vulnerabilität einstellen. Es handelt sich meist um die am Rand von Vernässungszonen liegenden, als Kontaktkarst ausgebildeten Ponordolinen.

Eine hohe Vulnerabilität ist charakteristisch für die schwächer verkarsteten Kalkschollen mit Lockergesteinsbedeckung und tiefgründigerer Bodenentwicklung. Wettersteindolomit, Kalkmergel sowie rezente Talfüllungen und Blockschuttflächen sind, so fern sie nicht von glazialen Sedimenten bzw. mächtigen Böden überlagert werden, ebenfalls als hoch vulnerabel einzustufen.

Mittlere Vulnerabilität wurde für alle übrigen Gebiete berechnet. Dazu zählen neben den großen Arealen mit stauender Allgäu-Formation und Zlambachschichten bzw. Haselgebirge auch jene Flächen, die durch mächtige Moränenablagerungen und hohen oberirdischen Rückhalt gekennzeichnet sind. Durch die in den Mergelarealen des Projektgebiets auftretenden Massenbewegungen kann entlang von Abrisskanten und den Gleitflächen selbst in Stauern Infiltration und eine seichtliegende Wasserzirkulation stattfinden. Diese erschwert bzw. verhindert die Ausweisung von Zonen mit geringer oder sehr geringer Vulnerabilität. Nur aus einer sehr detaillierten Erfassung der Speicherfähigkeit der Mergelgesteine mit mächtiger Überdeckung wäre eine Ableitung gering vulnerabler Bereiche möglich.

VI. AUSBLICK

Das VURAAS-Bewertungsschema hat sich auch bei seiner zweiten Anwendung, diesmal im Salzkammergut, als sehr flexibel erwiesen und ein schlüssiges Ergebnis erbracht. Die detaillierte Betrachtung der Infiltrationsbedingungen hat gezeigt, dass die Vulnerabilität nicht allein aus einer lithologischen Klassifizierung abgeschätzt werden kann. Die stark geklüfteten Malmkalke des Projektgebiets fallen beispielsweise in die Klasse 1. Das Fehlen tieferer Spalten und die Bedeckung mit mittelgründigem Kalklehm kann aber zu einer Einstufung in die Klasse 2 führen. Die nicht-verkarstungsfähigen Mergel erreichen dagegen eine sehr hohe Vulnerabilität, wenn sie über punktuelle Infiltrationsstellen drainiert werden.

Die umfangreiche Datenerhebung für die drei Kernfaktoren war trotz Verfügbarkeit gebietsrelevanter geowissenschaftlicher Literatur und einiger thematischer Karten äußerst arbeitsintensiv. Wenn sämtliche Layer eigenhändig digitalisiert werden müssen, bringt zwar der Einsatz geographischer Informationssysteme keine Zeitersparnis, doch wären ohne GIS-Werkzeuge eine rasche Aktualisierung, Berechnung und Verschneidung der einzelnen Layer undurchführbar. Spezielle GIS-basierte Analysemethoden könnten in Kombination mit geostatistischen Methoden die Vulnerabilitätskartierung zukünftig noch deutlich rationeller gestalten. Durch die unterschiedliche Gewichtung von [I]- und Δ -Klasse wird die Erfassung der Parameter bereits entscheidend vereinfacht, sodass die Methode auch im Rahmen einer Studie mit rigidem Zeitlimit durchführbar ist. Müsste jeder Subfaktor der Δ -Klasse flächendeckend und genau (d. h. ohne Schätzung auf den mittleren Wert 1) bestimmt werden, würde das den organisatorischen, finanziellen und zeitlichen Rahmen sprengen. α -Werte und aus Tritium-Analysen abgeleitete Verweilzeiten werden in vielen Fällen nicht zur Verfügung stehen.

Das VURAAS-Konzept basiert auf pedologischen, geomorphologischen, geologischen und hydrologischen Kriterien, welche speziell das hydrodynamische Verhalten eines Karstsystems charakterisieren. Damit wird nicht nur die Ausweisung neuer Grundwasserschutzzonen erleichtert, sondern können auch bestehende Schutzmaßnahmen in ihrer Wirksamkeit verbessert werden. Die Anwendung der fünf Vulnerabilitätsklassen als Bewertungsgrundlage für die Dimensionierung von Schutzzonen beschreibt Hartmut Zojer (2003) genauer.

Der vermehrte anthropogene Einfluss auf Gebirgsregionen, besonders in deren dicht besiedelten Talräumen und vor allem in Tourismusregionen scheint unabwendbar. Dazu ist im Sinne des wirtschaftlichen Fortschritts die Durchführung baulicher Maßnahmen ebenso erforderlich wie die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung.

Somit kann die Vulnerabilitätskartierung ein wertvolles Instrument und eine wichtige Entscheidungsgrundlage für den Raumplaner werden. Durch die Anwendung von VURAAS ist die Ausweisung vulnerabler Bereiche bereits in der Planungsphase möglich. Vor allem in Gemeinden mit Karstwasserversorgung wäre die Einbeziehung einer Vulnerabilitätskarte bei der Diskussion von Raumordnungsfragen zu überlegen. Nachträgliche Nutzungskonflikte können durch eine Aufnahme des Vulnerabilitätskonzepts in das UVP-Verfahren minimiert werden.

LITERATUR

- Cichocki G. 2003. Wassertransport als Grundlage für eine Vulnerabilitätsbewertung und Risikoanalyse in Karbonatgesteinen. Testgebiet Nassfeld, Karnische Alpen. Diss. Techn. Naturwiss. Fak. Techn. Univ. Graz. 170p., 80 Abb., 29 Tab., Graz.
- Doerflinger N., Zwahlen F. 1998. Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK). Praxishilfe des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). 57p., 26 Abb., 6 Tab., Anh., Bern.
- Goldscheider N. et al. 2000. The PI methode – a GIS based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Zeitschr. f. angew. Geol. **46(3)**, 157-166, Karlsruhe.
- Laimer H. J. 2004. Karstwasserdynamik des Ischler und Ausseer Salzbergs. Karstmorphologie, Karsthydrogeologie und Karstvulnerabilität der Hallstätter Zone von Ischl – Aussee. Diss. Naturwiss. Fak. Univ. Salzburg. 272p., 67 Abb., 59 Tab., Salzburg.
- Mandl G. W. 1982. Jurassische Gleittektonik im Bereich der Hallstätter Zone zwischen Bad Ischl und Bad Aussee (Salzkammergut, Österreich). Mitt. d. Ges. d. Geologie- und Bergbaustud. Österreichs **28**, 5-76, Wien.
- Mandl G. W. 1984. Zur Trias des Hallstätter Faziesraumes – ein Modell am Beispiel Salzkammergut (Nördliche Kalkalpen, Österreich). Mitt. d. Ges. d. Geologie- und Bergbaustud. Österreichs **30/31**, 133- 176, Wien
- Zojer Hans 1978. Vergleiche von Ergebnissen der Anwendung von Isotopenmethoden in alpinen Karstgebieten. Steir. Beitr. z. Hydrogeol. **30**, 127-138, Graz.
- Zojer Hartmut 2003. Stofftransport als Grundlage für Vulnerabilitätsbewertung und Risikoanalyse in Karbonatgesteinen. Testgebiet Nassfeld. Karnische Alpen. Diss. Techn. Naturwiss. Fak. Techn. Univ. Graz. 152p., 85 Abb., Anh., Graz.

