

Konzept der Vulnerabilität im Grundwasserschutz

Anwendung auf die Verhältnisse der Schweiz

Concept de la vulnérabilité dans la protection des eaux souterraines Application à la situation en Suisse

Les mesures d'aménagement du territoire destinées à protéger les eaux souterraines visent surtout les surfaces d'un bassin d'alimentation où les activités humaines pourraient augmenter la probabilité d'une atteinte à la qualité de l'eau captée (concept des zones de protection). Dans le cas des aquifères hétérogènes, qui, en raison de leurs caractéristiques hydrogéologiques, présentent une vulnérabilité élevée à la pollution, il faut appliquer une démarche adaptée. La vulnérabilité de l'eau souterraine dans le bassin d'alimentation d'un captage peut être déterminée en cartographiant les facteurs de protection naturels de la nappe. Cet article présente une vue d'ensemble de la vulnérabilité des divers types d'aquifères de Suisse ainsi que les méthodes permettant d'évaluer la distribution spatiale de ce paramètre.

Concept of vulnerability in groundwater protection Implementation in Switzerland

In spatial planning, groundwater protection measures focus mainly on those surfaces situated within a groundwater catchment area, in which human activities could increase the risks to the drinking water supply (concept of protection zoning). In the case of heterogeneous aquifers, which are highly susceptible to contamination, a special approach has to be used, which takes into account the aquifer's vulnerability. Vulnerability can be determined by mapping the natural protection factors of a groundwater resource. This article presents an overview of the vulnerability of the different types of aquifers in Switzerland and describes the methods used to assess the spatial distribution of this parameter.

Michael Sinreich



Der planerische Grundwasserschutz zielt besonders auf diejenigen Flächen eines Einzugsgebietes ab, auf denen menschliche Aktivitäten zu einer erhöhten Gefährdung des gefassten Grundwassers führen könnten (Schutzzonenkonzept). In heterogenen Grundwasserleitern, deren hydrogeologische Eigenschaften eine hohe Empfindlichkeit (Vulnerabilität) gegenüber Schadstoffeintrag bedeuten, erfordert dies eine spezielle Vorgehensweise. Die Vulnerabilität im Einzugsgebiet einer Fassung kann mittels Kartierung der natürlichen Schutzfaktoren eines Grundwasservorkommens bestimmt werden. Der Artikel gibt einen Überblick über die Vulnerabilität der unterschiedlichen Typen von Grundwasserleitern in der Schweiz und stellt die Methoden zu deren flächenhafter Erhebung dar.

1. Einleitung

Der effiziente Schutz der *Ressource Grundwasser* stellt eine grundlegende Voraussetzung für die Versorgung der Bevölkerung mit qualitativ hochwertigem *Trinkwasser* dar. Mehr als 80 % des Trinkwassers wird in der Schweiz aus Grundwasservorkommen gewonnen; daneben wird Grundwasser auch für industrielle und landwirtschaftliche Zwecke genutzt. Die geologische und hydrologische Vielfalt des Landes spiegelt sich in den hydrogeologischen Verhältnissen wider und erfordert diversifizierte und angepasste Strategien für den Schutz und die nachhaltige Nutzung der unverzichtbaren Ressource Grundwasser. Insbesondere sind Anstrengungen und Massnahmen nötig,

um die in der kleinräumigen Schweiz häufigen *Nutzungskonflikte* zwischen intensiver Landnutzung und Grundwasserschutz bestmöglich zu lösen. Zu diesem Zweck verfolgt die Schweiz ein *Konzept des präventiven Grundwasserschutzes*, welcher Verschmutzungen und quantitative Beeinträchtigungen bereits von vornherein verhindern soll, so dass teure und oft langwierige Sanierungen vermieden werden können. Diese Beeinträchtigungen sollen durch angepasste lokale, regionale und zum Teil eingriffsspezifische Nutzungseinschränkungen unterbunden werden. Das ist umso wichtiger angesichts des bedeutenden wirtschaftlichen Faktors, den diese stille Ressource im Untergrund darstellt [1]. Der *Schutz des Grundwassers* wird im eidgenössischen Gewässerschutzgesetz (GSchG) von 1991 [2] sowie in der zugehörigen Gewässerschutzverordnung von 1998 (GSchV) geregelt [3]. Während der Vollzug dieser Vorgaben bei den Kantonen liegt, stellt der Bund die Gesamtstrategie und Vollzugshilfen für eine koordinierte und einheitliche Umsetzung zur Verfügung, allem voran die *Wegleitung Grundwasserschutz* [4]. Zusätzlich kann auf vielfältige Hilfsmittel zurückgegriffen werden, wie etwa hydrogeologische Grundwasser- und Gewässerschutzkarten [5] oder auch die Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung auf kantonaler und nationaler Ebene [6, 7]. Ein wichtiges Element des präventiven Grundwasserschutzes ist die Anwendung des Prinzips der *Vulnerabilität*. Vulnerabilitätskarten zeigen an, welche Teile des Einzugsgebietes besonders anfällig gegenüber einer potentiellen Verschmutzung sind und welche über einen guten natürlichen Schutz verfügen. Damit weisen Vulnerabilitätskarten jene Flächen aus, in denen im Rahmen des planerischen Grundwasserschut-

zes verstärkte Massnahmen (z. B. in Form von Grundwasserschutzzonen) erforderlich sind.

2. Prinzip der Vulnerabilität

2.1 Definition

Im hydrogeologischen Zusammenhang beschreibt der Begriff der Vulnerabilität die Empfindlichkeit eines Einzugsgebietes bzw. Grundwasservorkommens gegenüber dem *Eintrag von Schadstoffen* in den Untergrund. Diese Schadstoffe, die an der Geländeoberfläche freigesetzt werden, können mit dem Niederschlag oder durch Flusswasserinfiltration in das Grundwasser eingebracht werden. Vulnerabilität ist eine relative, nicht direkt messbare Grösse. Sie kann durch die Erfassung und anschließende Verknüpfung verschiedener Parameter erhoben werden, welche als entscheidend für den Schutz des Grundwassers angesehen werden (*Multikriterien-Ansatz*). Je besser das Grundwasser auf natürliche Weise geschützt ist, desto geringer ist dessen Vulnerabilität – und umgekehrt. Es wird also meist nicht die Vulnerabilität selbst abgeschätzt, sondern diese wird indirekt aus Art und Ausbildung verschiedener Schutzfaktoren erhoben. Ein wichtiger Aspekt für die Erhebung der Vulnerabilität ist das Ausmass der *Schutzwirkung* einer geologischen Deckschicht, welche sich zwischen der Geländeoberfläche und dem zu schützenden Grundwasservorkommen befindet [8, 9, 10]. Die sogenannte *intrinsische Vulnerabilität* beruht auf einem rein hydraulischen Ansatz. Zur Erhebung der intrinsischen Vulnerabilität werden ausschliesslich dem System inhärente Eigenschaften in Form von pedologischen, hydrologischen und hydrogeologischen Parametern erfasst. Eine intrinsische Vulnerabilitätskarte ist deshalb für jegliche Art

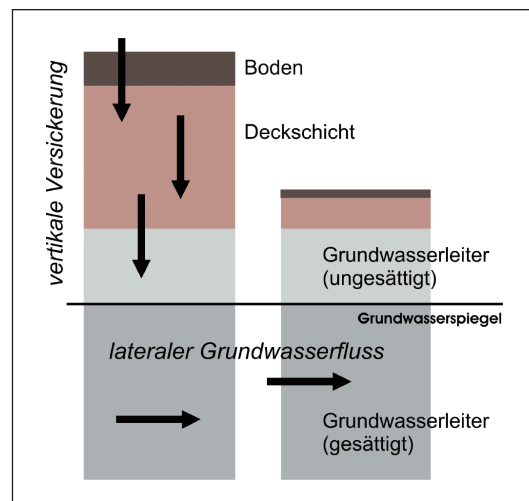


Abb. 1 Konzept der Vulnerabilität mit Übersicht der einzelnen Schutzfaktoren Boden, Deckschicht und ungesättigter Teil des Grundwasserleiters (links geringe Vulnerabilität, rechts hohe Vulnerabilität). Soll eine bestimmte Grundwasserfassung geschützt werden, so ist noch der laterale Transport im gesättigten Untergrund miteinzubeziehen.

von Schadstoffeintrag gültig [9]. Demgegenüber steht die *spezifische Vulnerabilität*, welche zusätzlich die Eigenschaften einzelner Schadstoffe und deren Wechselwirkung mit dem Untergrund berücksichtigt [9, 11, 12].

2.2 Konzept

Die Schutzwirkung – und als Funktion davon die Vulnerabilität – können im Gelände qualitativ erfasst und in eine Reihe von Klassen eingestuft werden. Klassen unterschiedlicher Vulnerabilität können als Mass für die *Wahrscheinlichkeit* interpretiert werden, inwieweit Schadstoffe eine Grundwasserressource bzw. -fassung erreichen können [11, 13].

Überdeckung

Wird ein Grundwasservorkommen als solches betrachtet (*Schutz der Ressource*), können sämtliche Schichten, die das Grundwasser überlagern (*Grundwasser-Überdeckung*), zur Erhebung der Vulnerabilität herangezogen werden (*Abb. 1*). Dazu gehören die Bodenschicht, Deckschichten sowie der ungesättigte Teil des Grundwasserleiters selber. Je mächtiger und geringer durchlässig diese Schichten sind, desto langsamer geht der *vertikale Transport von Schadstoffen* über das Sickerwasser ins Grundwasser vor sich (längere Verweilzeit) und desto höher ist also der Schutz gegenüber Schadstoffeintrag (Wirksamkeit von Abschwächungsprozessen). Dies setzt allerdings voraus, dass die Deckschichten keine präferenziellen Fliesswege aufweisen, entlang derer das Sickerwasser rasch

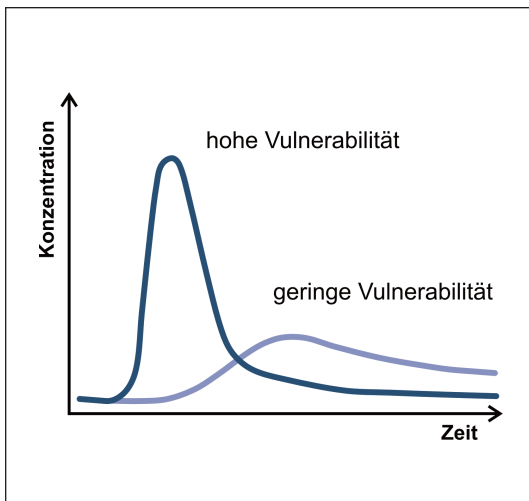


Abb 2 Durchgangskurven von Markierversuchen, welche unterschiedliche Teileinzugsgebiete einer Grundwasserfassung repräsentieren (hohe Vulnerabilität bei schneller Ankunft des Stoffes in hoher Konzentration; geringe Vulnerabilität bei längerer Verweilzeit und abgeschwächter Konzentration).

und konzentriert die an und für sich wenig durchlässigen Schichten passieren kann [11, 14]. Haben Schadstoffe erst einmal das Grundwasser erreicht, so werden sie in der Regel *lateral* mit dem Grundwasserfluss verfrachtet. Wird eine bestimmte Grundwasserfassung betrachtet (*Schutz der Fassung*), muss zusätzlich zum vertikalen Sickertransport auch der Transport mit dem Grundwasser bis zur Fassung berücksichtigt werden. Letzterer hängt von den geologischen Eigenschaften und den Fliessverhältnissen im Grundwasserleiter ab [15]. Da Schadstoffe meist an der Geländeoberfläche (z. B. bewusst in der Landwirtschaft oder ungewollt durch Unfälle und diffuse Deposition) freigesetzt werden und mit Niederschlags- oder Flusswasser in den Untergrund gelangen, spielen auch die meteorologisch-hydrologischen Verhältnisse eine entscheidende Rolle für die Betrachtung der Vulnerabilität [11].

Flächenansatz

Veranschaulichen und quantitativ beschreiben lässt sich die Vulnerabilität eines bestimmten Ortes eines Einzugsgebietes am besten dadurch, dass man den Verlauf des Schadstofftransports von der Geländeoberfläche bis zum Grundwasser, bzw. zur Grundwasserfassung betrachtet. In der Praxis geschieht dies mittels *Markierversuchen*, bei deren Durchführung ein Markierstoff (meist ein fluoreszierender Farbstoff) in den Untergrund eingebracht und sein Auftreten und Konzentrationsverlauf an einer Fassung oder an Quellaustritten verfolgt wird

[16]. Ein Teileinzugsgebiet ist umso vulnerabler, je schneller und in je höherer Konzentration der potentielle Schadstoff, resp. der Markierstoff, an der Fassung ankommt [17] (*Abb. 2*).

Der Konzentrationsverlauf eines Markierstoffes an der Fassung (Durchgangskurve) zeigt somit nicht nur die hydraulische Verbindung zwischen Eingabe- und Beprobungsort an, sondern integriert auch verschiedene Prozesse, die die Vulnerabilität des Eingabeortes bestimmen (*Verweilzeit, Speicherung, Dispersion, Verdünnung*); die intrinsische Vulnerabilität berücksichtigt jedoch nicht den biologischen Abbau und andere schadstoffspezifische Prozesse.

Markierversuche sind deshalb auch ein geeignetes Mittel zur punktuellen Überprüfung von Vulnerabilitätskarten, v. a. in Karstgebieten [18, 19].

Systemansatz

Entsprechend [20] kann der Begriff der Vulnerabilität auf eine weitere Weise verwendet werden: Neben der *flächenhaft* erhobenen Vulnerabilität, für die jeder Ort eines Einzugsgebietes hinsichtlich seiner Empfindlichkeit gegenüber Schadstoffeintrag betrachtet wird, kann auch ein Einzugsgebiet bzw. ein Grundwasservorkommen als Ganzes betrachtet werden. So äussert sich ein hoher Flächenanteil vulnerabler Teilbereiche insgesamt in einer hohen Vulnerabilität des *hydrogeologischen Systems*. Das Verhalten einer Quelle, als natürlicher Austrittsort eines Grundwasservorkommens, liefert ein repräsentatives Bild des gesamten Einzugsgebietes und spiegelt damit quasi die Summe der räumlichen Vulnerabilität des Einzugsgebietes wider. Quellen aus vulnerablen Grundwasservorkommen zeichnen sich durch eine hohe *Variabilität der Schüttung* (*Abb. 3*) sowie der physikalisch-chemischen Wasserparameter

aus. Oft gehen diese mit deutlichen und stark variablen mikrobiellen Belastungen einher [21]. Im Gegensatz zur flächenhaften Vulnerabilität, die am besten durch punktuelle Markierversuche beschrieben werden kann, können folglich zur Bestimmung der Vulnerabilität des Gesamtsystems Analysen des Abfluss- bzw. Pegelverhaltens eines Grundwasservorkommens (*Hydrogramme*) und der Entwicklung anderer einfacher physikalisch-chemischer Wasserparameter (elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Trübung) herangezogen werden [20].

Aus hydrogeologischer Sicht hängt die Vulnerabilität eines Grundwasservorkommens, neben der Überdeckung, in erster Näherung von der Gesteinseinheit und damit vom Typus des Grundwasserleiters ab (Lockergesteins-, Kluft- und Karst-Grundwasserleiter). Im Folgenden werden die Grundwasserleitertypen der Schweiz kurz zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich ihrer Vulnerabilität (Systemansatz und Flächenansatz) beschrieben.

3. Hydrogeologie Schweiz

3.1 Grundwasserleitertypen

In der Schweiz kommen verschiedene Typen von *Grundwasserleitern* in unterschiedlichen geologischen Einheiten vor [22]. Die hydrogeologische Natur dieser Grundwasserleiter – zusammen mit dem regionalen geologischen Kontext, in dem sie vorkommen – definiert die Vulnerabilität der jeweiligen Systeme. Generell ist das Grundwasser umso besser gegenüber Schadstoffeintrag geschützt, je mächtiger und weniger durchlässig die über dem Grundwasserleiter liegenden Deckschichten ausgebildet sind und je länger das Wasser im Untergrund verweilt, bevor das Grundwasser bzw. eine Grundwasserfassung erreicht werden [11].

Lockergesteins-Grundwasserleiter

Bedeutende *Lockergesteins-Grundwasserleiter* sind in der Schweiz vor allem entlang der grossen Flüsse des Mittellandes sowie in den Alpentälern ausgebildet. Die Schutzwirkung ist hier insbesondere an den Boden und geologische Deckschichten gebunden, während der ungesättigte Bereich des Grundwasserleiters aufgrund geringer Flurabstände eher zweitrangig ist. Aber auch innerhalb des gesättigten Untergrunds fliesst das Grundwasser relativ langsam und gleichmässig durch die Poren eines mehr oder weniger homogenen Korngerüsts. Im Allgemeinen verfügen Lockergesteins-Grundwasserleiter daher eher über eine geringe bis mässige Vulnerabilität. Deshalb und wegen ihrer grossen *Ergiebigkeit* stellen sie trotz ihrer vergleichsweise geringen räumlichen Verbreitung (etwa 6 % der Landesfläche) mit ca. 36 % einen wesentlichen Anteil der Trinkwasservorsorgung der Schweiz sicher [23]. Diese Vorkommen sind in der Regel durch Pumpbrunnen erschlossen.

Neben der direkten *Versickerung* von Niederschlagswasser erfahren hydraulisch an Flussläufe gebundene Lockergesteins-Grundwasserleiter ihre Neubildung auch durch die *Infiltration von Flusswasser*. Deshalb verfügen Förderbrunnen in Flussnähe, bei denen ein wesentlicher Anteil der Entnahmemenge aus Uferfiltrat besteht, oft nur über einen geringen natürlichen Schutz gegenüber Schadstoffeintrag [24]. Insbesondere Hochwasserereignisse, die meist mit einer Belastung des Flusswassers einhergehen (vor allem Trübstoffe, pathogene Keime), können sich negativ auf die Qualität des geförderten Wassers auswirken [25, 26]. *Abbildung 4* zeigt das an einer Messstelle der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA aufgezeichnete Hydrogramm eines Lockerge-

steins-Grundwasserleiters im Mittelland. Das Einzugsgebiet ist von einer ca. 30 m mächtigen Deckschicht aus lehmigen Schottern und Lössablagerungen geprägt, wodurch eine hohe *natürliche Schutzwirkung* gegenüber Schadstoffeintrag gegeben ist. Dies drückt sich auch in der trägen Reaktion des Grundwasserstandes gegenüber den meteorologischen Verhältnissen aus. Niederschlagsereignisse wirken sich hier erst mit einer Verzögerung von mehreren Monaten und mit entsprechender *Dämpfung* auf den Grundwasserstand aus. Im Hydrogramm ist deshalb lediglich eine langsame, saisonal bedingte Abnahme zu verzeichnen, ohne signifikante Pegelschwankungen als Reaktion auf aktuelle Niederschläge, was eine geringe Vulnerabilität des Systems anzeigt. Die meisten Schadstoffe, die hier in den Untergrund versickern, erfahren deshalb eine ausreichende Konzentrationsabschwächung, bevor sie den Grundwasserspiegel erreichen.

Kluft-Grundwasserleiter

Der Untergrund der Schweiz besteht zu ca. 78 % aus Kluftgesteinen (Mittelland, Alpen), zum Teil unter geringer Bedeckung, wobei die unterschiedlichsten Formen von *Kluft-Grundwasserleitern* ausgebildet sind [20]. Generell fliesst das Grundwasser in diesen Gesteinen entlang eines Netzes diskreter Klüfte und auch grösserer Störungen. Sind diese Wasserwegsamkeiten sehr *heterogen* ausgebildet (hohe Fliessgeschwindigkeiten) und fehlt zudem eine schützende Deckschicht, ist das hydrogeologische System vulnerabel. Quellen, die solche Grundwasserleiter entwässern, reagieren dann deutlich auf grössere Niederschlagsereignisse. Allerdings gibt es ebenso Kluft-Grundwasserleiter, die aufgrund einer homogenen und aus feinen Spalten

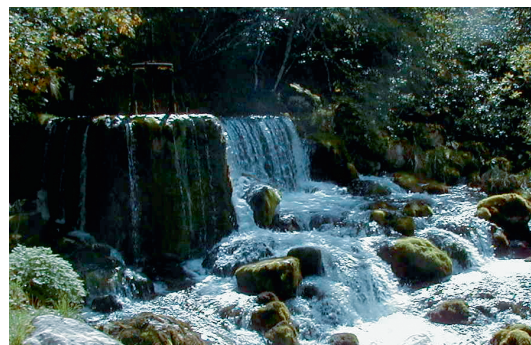


Abb. 3 Karstquelle im Jura bei Niedrigwasser- und Hochwasser-Verhältnissen. Im Zuge von Niederschlägen wird ein Vielfaches des Basisabflusses erreicht, was die direkte Zufuhr von neu infiltriertem Wasser und damit die hohe Vulnerabilität des Karst-Grundwasserleiters belegt.

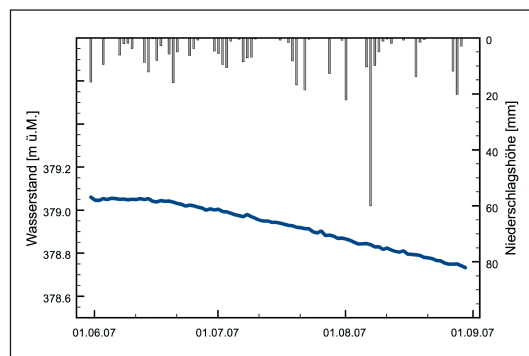


Abb. 4 Hydrogramm einer NAQUA-Messstelle in einem mit Deckschichten überlagerten Lockergesteins-Grundwasserleiter des Mittellandes. Die Pegelstände reagieren nicht auf aktuelle Niederschlagsereignisse, was die geringe Vulnerabilität des Systems anzeigt.

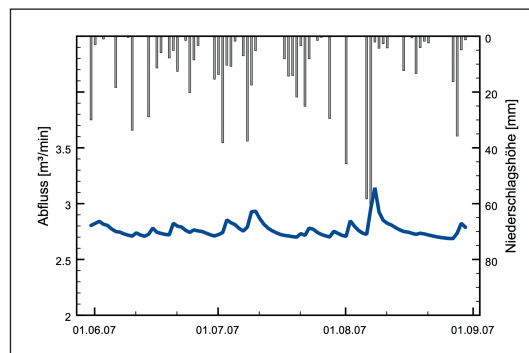


Abb. 5 Hydrogramm einer NAQUA-Messstelle an einer Molassequelle im Mittelland. Der Kluft-Grundwasserleiter reagiert moderat auf starke Niederschlagsereignisse und weist somit eine mittlere Vulnerabilität auf.

bestehenden Klüftung oder auch aufgrund des Fliessens innerhalb der Poren des Festgesteins weniger direkt auf Oberflächeneinflüsse reagieren und sich deshalb durch eine eher geringe Vulnerabilität auszeichnen. Grundwasser aus Kluftgesteinen deckt etwa 30 % des Wasserbedarfs der Schweiz ab und wird hauptsächlich mittels Quelfassungen gewonnen.

Das Hydrogramm der *Abbildung 5* zeigt den Fall einer Quelle des *NAQUA-Messnetzes*, die durch einen Kluft-Grundwasserleiter der Molasse gespeist wird. Der heterogene Charakter des Kluftgesteins führt dazu, dass die Quellschüttung bei grösseren Niederschlagsereignissen signifikant um bis zu 10 % ansteigt. Einzelne kleine Ereignisse mit geringen Niederschlagshöhen führen dagegen zu keiner unmittelbaren Reaktion im Hydrogramm. Kürzlich infiltriertes und damit potentiell belastetes Wasser kann also die Fassung schnell erreichen, macht jedoch nur einen geringen Anteil der Quellschüttung aus. Insgesamt kann dem hydrogeologischen System somit eine mittlere Vulnerabilität zugeordnet werden.

Karst-Grundwasserleiter

Karstgebiete sind in der Schweiz entlang des Jura sowie in den Alpen verbreitet (ca. 16 % der Landesfläche); dortige Quellen tragen mit etwa 18 % zur Wasserversorgung der Schweizer Bevölkerung bei. In Karstsystemen können Schadstoffe über bevorzugte Infiltrationspunkte (Dolinen, Schwinden) schnell und ohne wesentliche Filterung oder Verzögerung das Grundwasser erreichen, vor allem wenn der oberste Verwitterungsbereich des *Karst-Grundwasserleiters*, der so genannte Epikarst, ausgebildet ist. Im gesättigten Untergrund erfolgt ein ebenso rascher lateraler Transport entlang eines gut entwickelten Röhren- und Höhlen-

systems hin zum Quellaustritt. Im Extremfall ist die Verdünnung praktisch der einzige Prozess, welcher zur Verminderung einer Schadstoffkonzentration führt. Deshalb weisen Karst-Grundwasserleiter in der Regel eine erhöhte Vulnerabilität auf, welche sich in hohen Schwankungen der Quellschüttung (unmittelbar nach Niederschlagsereignissen (*Abb. 3*), oder bei Schneeschmelze) sowie qualitativen Beeinträchtigungen durch starke *Trübung* und *mikrobielle Verunreinigungen* äussert [21]. *Abbildung 6* ist das Hydrogramm einer typischen Karstquelle, aufgenommen an einer NAQUA-Messstelle in einem alpinen Karst-Grundwasserleiter. Es zeigt sich, dass die Quelle bereits auf geringe Niederschlagsereignisse sensibel reagiert. Dabei kann die Quellschüttung auf ein Mehrfaches des Basisabflusses ansteigen. Das bedeutet, dass im Zuge dieser Ereignisse eingeschwemmte Schadstoffe das Grundwasser schnell und in hoher Konzentration erreichen können, zumal das an der Quelle austretende Wasser zum grössten Teil neu infiltriert wurde und nur eine äusserst *geringe Verweilzeit* im Untergrund aufweist (einige Stunden bis Tage). Dies liegt nicht nur daran, dass der Grundwasserleiter selbst keine signifikante Schutzwirkung besitzt, sondern dass im Einzugsgebiet dieser Karstquelle – wie in den meisten Fällen in der Schweiz – wirksame Deckschichten fast völlig fehlen und nur dünne Bodenschichten ausgebildet sind. Das Karstsystem kann somit generell als sehr vulnerabel bezeichnet werden.

3.2 Vulnerabilitätskarte

Während Hydrogramme von Grundwasserständen und Quellschüttungen im Allgemeinen ein gutes Abbild der gesamten Vulnerabilität eines einzelnen Grundwasserleiters geben, zeigen *Vulnerabilitätskarten* flächen-

haft die räumliche Verteilung der Vulnerabilität an. Diese ist dann vor allem durch die Schutzwirkung der Deckschichten geprägt und liefert ein differenziertes Bild eines hydrogeologischen Einzugsgebietes.

Für die Schweiz wurde eine Karte mit der räumlichen Verteilung der *Vulnerabilität der Grundwasservorkommen* im Massstab 1:500 000 erarbeitet [10, 27], welche in *Abbildung 7* verkleinert dargestellt ist. Zur Erstellung wurde eine spezielle Erhebungsmethodik entwickelt, welche es erlaubt – basierend auf der Karte Grundwasservorkommen der Schweiz [28, 29] – das Konzept der Vulnerabilität auf alle Typen von Grundwasserleitern anzuwenden. Dafür wurden für alle Grundwasservorkommen die Schutzwirkung des Bodens, der Deckschichten (vor allem für Lockergestein-Grundwasserleiter) sowie des ungesättigten Teils des Grundwasserleiters berücksichtigt. Die Karte gibt somit den *Schutz* vor einer raschen Versickerung in das Grundwasser und damit die flächenhafte Verteilung der Vulnerabilität der Grundwasserressourcen wieder. Die detaillierte Erhebungsmethodik kann [10] entnommen werden.

Vergleicht man die Ergebnisse dieser Erhebung mit einer räumlichen Übersicht der Grundwasserleitertypen in der Schweiz [22], so stellt man eine gute Übereinstimmung fest. Karstgebiete sowie alpine Kluftgesteine finden sich auf der Vulnerabilitätskarte als orange bzw. rote Flächen wieder (hohe bis sehr hohe Vulnerabilität, resp. mässige bis geringe Schutzwirkung). Weite Bereiche des Mittellandes mit weniger stark geklüfteten Festgesteinen der Molasse weisen dagegen eine geringe Vulnerabilität auf. Die grösste Variabilität der Vulnerabilität zeigen die Lockergesteins-Grundwasserleiter, abhängig von der Ausbildung und

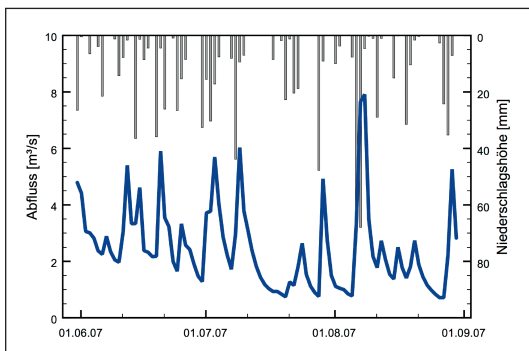


Abb. 6 Hydrogramm einer NAQUA-Messstelle an einer alpinen Karstquelle. Die Quellschüttung reagiert mit deutlichen Schwankungen schon auf geringe Niederschlagshöhen, was die hohe Vulnerabilität des Systems belegt.

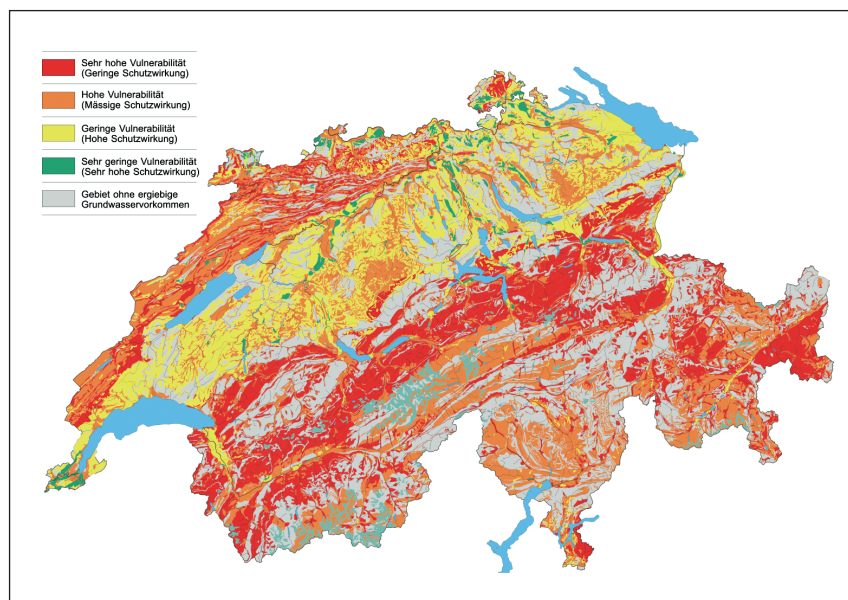


Abb. 7 Karte der Vulnerabilität der Grundwasservorkommen in der Schweiz [10, 27]. Karst- und Kluft-Grundwasserleiter der Alpen und des Jura zeichnen sich durch eine hohe flächenhafte Vulnerabilität, die Molassegesteine des Mittellandes und die Lockergesteins-Grundwasserleiter entlang der grossen Flusstäler durch eine variable Vulnerabilität aus.

Mächtigkeit allfälliger Deckschichten bzw. der Mächtigkeit des ungesättigten Untergrundes.

Die Vulnerabilitätskarte der Schweiz beinhaltet auch Informationen zum *lateralen Ausbreitungsvermögen* von Schadstoffen (in Abb. 7 nicht dargestellt), welches ein Mass für die Fliessgeschwindigkeit im gesättigten Untergrund des Grundwasserleiters ist. Deshalb zeichnen die Klassen für das Ausbreitungsvermögen die Grenzen der Grundwasserleiter-Typen nach, und zwar mit einem hohen Ausbreitungsvermögen im Karst und in heterogenen Kluft-Grundwasserleitern, sowie einem mittleren Ausbreitungsvermögen in Lockergesteins- und wenig ergiebigen Kluft-Grundwasserleitern [10, 27]. Insgesamt gilt, dass es auch innerhalb von Grundwasserleitern mit einer insgesamt hohen Vulnerabilität gut geschützte Teilbereiche geben kann. Auf der anderen Seite müssen geringer vulnerable Systeme nicht durchgängig durch gute Deckschich-

ten gekennzeichnet sein. Dieser Effekt tritt auf regionaler oder gar lokaler Ebene noch verstärkt zu Tage, wobei dann allerdings die für eine kleinräumige Beurteilung notwendigen Detailkenntnisse fehlen, bzw. nur mit hohem Aufwand zu ermitteln sind. Deshalb kann eine Karte im nationalen Massstab nicht für konkrete Grundwasserschutzmassnahmen herangezogen werden. Sie kann aber als übergeordnetes *Planungsinstrument* oder auch als *didaktisches Hilfsmittel* verwendet werden.

4. Schutzzonenkonzept

4.1 Grundlagen

Der *planerische Grundwasserschutz* mit seinem präventiven Ansatz stellt in der Schweiz das wichtigste Element für den Schutz des Grundwassers als *Trinkwasserressource* dar. Dabei wird der Raum in verschiedene Bereiche, Zonen und Areale eingeteilt, in welchen unterschiedli-

che, auf den jeweiligen Standort abgestimmte Nutzungseinschränkungen gelten.

Das Konzept des planerischen Grundwasserschutzes folgt dabei – bezogen auf Grundwasserfassungen – dem Prinzip, dass von aussen gegen die Grundwasserfassung hin immer strengere *Schutzvorschriften* und *Nutzungseinschränkungen* gelten. Neben anderen Schutzelementen (u. a. flächendeckender Grundwasserschutz, Zuströmbereiche) stellen die dreiteiligen *Grundwasserschutzzonen* das grundlegende Instrument zum Schutz von Grundwasserfassungen dar [3]:

- Die *Zone S3* (Weitere Schutzzone) soll gewährleisten, dass bei unmittelbar drohenden Gefahren (z. B. Unfälle mit Wasser gefährdenden Stoffen) ausreichend Zeit und Raum für die erforderlichen Massnahmen zur Verfügung stehen.
- Die *Zone S2* (Engere Schutzzone) soll zusätzlich verhindern, dass z. B. mikrobielle Verunreinigungen in die Fassung gelangen oder Schadstoffe in der Nähe einer Grundwasserfassung freigesetzt werden.
- Die *Zone S1* (Fassungsbereich) soll zusätzlich verhindern, dass Fassungsanlagen beschädigt oder das geförderte Trinkwasser direkt verschmutzt wird.

Das schweizerische Schutzzonenkonzept stützt sich bei den grundsätzlich als homogen betrachteten Lockergesteins-Grundwasserleitern sowie homogenen Kluft-Grundwasserleitern in erster Linie auf das *Fliessverhalten* des Grundwassers im gesättigten Untergrund. Die schützende Wirkung der Deckschichten über dem Grundwasserleiter wird dabei aus pragmatischen Gründen in der Regel bewusst ausgeblendet. Für die Dimensionierung der entsprechenden Schutzzonen wird deshalb davon ausgegangen, dass die Gefährdung für das gefasste Grundwasser mit der Entfernung zur Fassung kontinuierlich abnimmt.

In heterogenen Kluft- und Karst-Grundwasserleitern trifft diese Annahme jedoch meist nicht zu. Man muss in diesen Fällen in Betracht ziehen, dass einzelne weit entfernte Flächen des Einzugsgebietes schnellere Fliessverbindungen zur Fassung aufweisen als einzelne nahe gelegene. Somit können Schadstoffe und pathogene Keime auch über weite Distanzen in kurzer Zeit in die Fassung gelangen. In den heterogenen Kluft- und Karst-Grundwasserleitern stellt deshalb die Erhebung der Vulnerabilität den geeigneteren Ansatz zur Dimensionierung von Schutzzonen dar.

Die Gewässerschutzverordnung schreibt denn auch explizit vor, dass für die *Bemessung von*

Grundwasserschutzzonen in Karst- und Kluftgesteinen die Vulnerabilität im Einzugsgebiet einer Grundwasserfassung massgebend ist. Diese wird anhand folgender Kriterien bestimmt [3]:

- Ausbildung des oberflächennahen Felsbereichs wie Epikarst und Auflockerungszonen
- Ausbildung der Deckschicht
- Versickerungsverhältnisse
- Ausbildung des Karstsystems oder der Trennflächensysteme

Für die Ausscheidung der Schutzzonen wird das Mass der Vulnerabilität dann nach einem Schema in die jeweiligen Teilzonen S1, S2 und S3 umgesetzt, welche nun nicht mehr um eine Grundwasserfassung herum angeordnet sein müssen, sondern je nach hydrogeologischen, pedologischen und topografischen Verhältnissen über das gesamte Einzugsgebiet verteilt sein können (Abb. 8).

4.2 Lockergesteins-Grundwasserleiter

Das hauptsächliche Kriterium für die Dimensionierung der engeren Schutzzone S2 in Lockergesteins-Grundwasserleitern ist die 10-Ta-

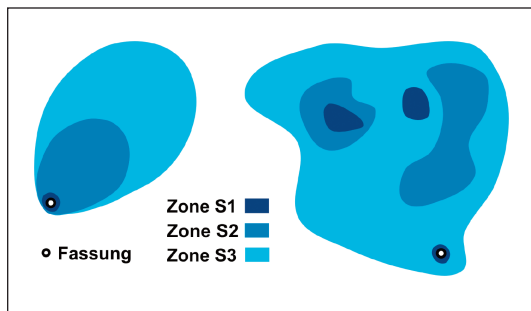


Abb. 8 Typische räumliche Verteilung von Schutzzonen um eine Fassung in einem Lockergesteins-Grundwasserleiter (links) und in einem Karst-Grundwasserleiter (rechts). Nur im mehrheitlich homogenen Untergrund kann die Annahme getroffen werden, dass die Verweilzeit des Wassers mit der Entfernung zur Fassung kontinuierlich zunimmt.

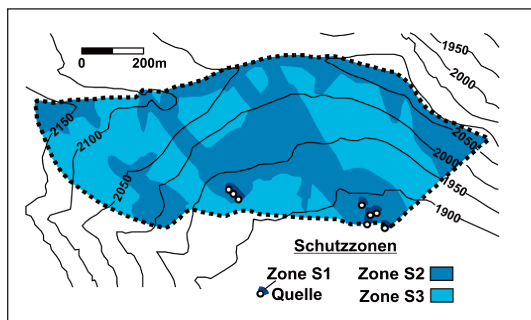


Abb. 9 Anwendungsbeispiel für die Vulnerabilitätsmethode DISCO im Quelleinzugsgebiet eines alpinen Kluft-Grundwasserleiters [20, 30]. Daraus abgeleitete Schutzzonen wären heterogen über das Einzugsgebiet verteilt; dies spiegelt die räumliche Verbreitung der Deckschichten und der bevorzugten Infiltrationsstellen entlang von Störungen wider.

ges-Linie. Das bedeutet, dass derjenige Teil des Einzugsgebiets einer Fassung als Zone S2 ausgeschieden wird, in dem das Grundwasser weniger als 10 Tage benötigt, um die Fassung zu erreichen (*Isochronen-Prinzip*). Dabei wird von der Voraussetzung ausgegangen, dass pathogene Mikroorganismen in der Regel nach einer Verweilzeit von 10 Tagen im Grundwasser eliminiert oder so stark zurückgehalten worden sind, dass von ihnen bei der Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser keine Gefahr für die menschliche Gesundheit mehr ausgeht.

Dabei kommt das Konzept der Vulnerabilität nur insofern zum Einsatz, als eine grössere Distanz zur Fassung generell auch eine geringere Vulnerabilität bedeutet. Die allfällige Schutzwirkung der Deckschicht wird grundsätzlich nicht berücksichtigt, weshalb z.B. bei Markierversuchen zur Bestimmung der *Fliessgeschwindigkeit* im Grundwasserleiter der Markierstoff entweder über ein Piezometer direkt ins Grundwasser eingespeist wird oder mit einem Baggerschlitz die Schutzwirkung des Bodens umgangen wird. Nur in Einzelfällen, wenn eine unverletzte, mächtige, homogene und undurchlässige Deckschicht nachweislich durchgehend vorhanden ist und diese in deutlichem Masse zu einer Verlängerung der *Verweilzeit* im Untergrund beiträgt, sieht die Gewässerschutzverordnung vor, dass diesem Umstand mit einer Verkleinerung der Zone S2 Rechnung getragen werden kann.

4.3 Kluft-Grundwasserleiter

Geklüftete Festgesteine können in ihrer Struktur sowohl homogen wie auch extrem heterogen aufgebaut sein. Im Fall einer vulnerablen Grundwasserfassung in stark heterogenen Kluftgesteinen ist der Schutz der Fassung bei Anwendung des Isochro-

nen-Prinzips nicht mehr gewährleistet. Basierend auf den Vorgaben der Gewässerschutzverordnung wurde deshalb die *Vulnerabilitätsmethode DISCO* entwickelt und als Praxishilfe publiziert [30]. Diese Methode ermöglicht die Erhebung der räumlichen Verteilung der Vulnerabilität im Einzugsgebiet von heterogenen Kluft-Grundwasserleitern. Die verschiedenen Schutzzonen werden dann aus den ermittelten Vulnerabilitätsklassen abgeleitet. Laut [3] soll dabei die Zone S1 die Gebiete umfassen, die eine besonders hohe Vulnerabilität aufweisen (z. B. Störungszonen), die Zone S2 diejenigen Gebiete mit hoher Vulnerabilität und die Zone S3 Gebiete mit mittlerer Vulnerabilität.

Die Multikriterien-Methode DISCO [20, 30] zieht für die Ermittlung der Vulnerabilität verschiedene Parameter wie die Fliessgeschwindigkeit entlang der Klüftung oder die Art und Mächtigkeit der schützenden Deckschichten heran. Anders als in Lockergesteins-Grundwasserleitern wird die Entfernung zur Fassung und somit die Fliesszeit im Grundwasserleiter nicht explizit berücksichtigt. Der massgebliche *Schutzeffekt* wird während des vertikalen Transports im ungesättigten Untergrund erzielt.

Ein Fallbeispiel für einen alpinen Kluft-Grundwasserleiter zeigt Abbildung 9. Auf Basis der Kartierung von Deckschicht und Klüftung ergibt sich ein Bild für die Schutzzonen, welches der Vulnerabilität an jedem einzelnen Punkt des Einzugsgebietes Rechnung trägt. So lässt sich beispielsweise gut erkennen, wie sich die Schutzzone S2 entlang tektonischer Störungen erstreckt. Solche *Störungszonen* gelten als bevorzugte Infiltrationsstellen für Niederschlagswasser und Schadstoffe und weisen deshalb eine erhöhte Vulnerabilität auf, zumal dort zu-

sätzlich oft noch die schützende Deckschicht fehlt (Abb. 10).

4.4 Karst-Grundwasserleiter

Karst-Grundwasserleiter weisen im Allgemeinen eine hohe Vulnerabilität auf, weil einerseits die Fließgeschwindigkeiten erheblich sein können und andererseits oft nur eine geringe oder gar keine Bodenbedeckung vorliegt (Abb. 11). Dennoch gibt es auch im Einzugsgebiet von Karstquellen Flächen, welche gegenüber dem Eindringen von Schadstoffen und Mikroorganismen einen erhöhten natürlichen Schutz aufweisen – und dies unter Umständen auch im Nahbereich einer Fassung. Für einen effizienten Grundwasserschutz ist es deshalb von Bedeutung, diejenigen Teilbereiche zu identifizieren, welche nur über einen geringen Schutz verfügen und insgesamt die hohe Vulnerabilität des Karst-Grundwasserleiters bewirken. Diese Flächen, wie etwa *Schwinden* und *Dolinen*, fallen gemäss [3] in die Schutzzone S1, sofern sie eine direkte Verbindung mit der Grundwasserfassung aufweisen. Wie bei den heterogenen Kluft-Grundwasserleitern umfasst die Zone S2 Gebiete mit hoher Vulnerabilität, die Zone S3 Gebiete mit mittlerer Vulnerabilität. Trotzdem können Grundwasserfassungen im Karst selbst bei optimal dimensionierten und konsequent umgesetzten Schutz zonen selten vollkommen vor Verschmutzungen bewahrt werden. Dies betrifft ganz besonders *mikrobiologische Verunreinigungen* während starker Niederschläge oder bei der Schneeschmelze. Allerdings reicht in den meisten Fällen eine einfache Aufbereitung des Trinkwassers zur Desinfektion aus. Zudem gibt es Indikatorwerte, wie z. B. die Trübung, welche darauf hinweisen, wann mit einer stärkeren Verschmutzung des Wassers zu rechnen ist und das Wasser verworfen werden sollte.

Für die Ausscheidung der Schutzzonen in Karstgebieten wurde die *Multikriterien-Methode EPIK* entwickelt [31, 32]. Ihr liegt die Berücksichtigung der vier in Kapitel 4.1 aufgeführten Kriterien zugrunde. Die Methode EPIK wird derzeit auf Basis der neusten Erkenntnisse aus der Karstforschung weiterentwickelt. Die typische Verbreitung der Vulnerabilität in Karstgebieten führt meist zu Schutzzonen, die über das gesamte Einzugsgebiet verteilt sind (siehe Abb. 8). So kann z. B. über Schwinden oder Karrenfelder verschmutztes Wasser ohne jede Filterung ins Grundwasser gelangen und entlang von Höhlensystemen selbst aus weiter Entfernung innerhalb weniger Stunden die Fassung erreichen. Solche schnellen Fließwege können in der Regel gut mittels Markierversuchen punktuell erfasst bzw. überprüft werden [16].

5. Fazit

Das Konzept der Vulnerabilität zum Schutz des Grundwassers als Trinkwasserressource hat sich national und international bewährt und wird umfassend eingesetzt. In der Schweiz wird die Vulnerabilität anhand zweier Methoden explizit zur Dimensionierung der *Grundwasserschutzzonen* in Karst- und heterogenen Kluft-Grundwasserleitern verwendet und stellt somit ein wichtiges Hilfsmittel für den Grundwasserschutz im Rahmen des Schutzzonenkonzeptes dar. Die Anwendung des Vulnerabilitätsansatzes hat bei diesen Grundwasserleitertypen insgesamt zu schlüssigeren und einheitlicheren Schutz zonen und einer gewissen Verringerung der Nutzungskonflikte geführt. Es ist deshalb sinnvoll, die Methoden DISCO und EPIK weiterhin und verstärkt anzuwenden. Gewisse Schwächen der Methode EPIK sollen mit der der-



Abb. 10 Morphologische Senken als bevorzugte Infiltrationsstellen für Niederschläge entlang einer tektonischen Störung in einem Kluft-Grundwasserleiter der Molasse [30]. Mitunter werden gerade solche besonders vulnerablen Flächen unerlaubterweise zur Ablagerung von Abfällen benutzt.



Abb. 11 Beispiel aus dem Einzugsgebiet einer Quelfassung in einem alpinen Karst-Grundwasserleiter. Neben einem vulnerablen Karrenfeld, von dem versickerndes Niederschlagswasser schnell das Grundwasser erreicht, liegen Flächen mit Bodenbedeckung vor, die einen signifikanten Schutz bewirken können, sofern sie nicht in vulnerable Teilflächen entwässern.

zeitigen Überarbeitung bereinigt werden. Darüber hinaus sollte in Zukunft grösseres Augenmerk auf die *Validierung* von Vulnerabilitätskarten und damit von Schutz zonen, z. B. durch Markierversuche im Gelände, gerichtet werden. Zusätzlich ist es sinnvoll, zum Schutz einer Fassung auch Informationen zu den tatsächlich im Fassungseinzugsgebiet vorhandenen Gefahrenherden und Schadstoffquellen einzubeziehen. Dies ergibt Risiko-Karten, welche für jede Fläche ausweisen, welches Risiko einer Grundwasserverunreinigung aufgrund der natürlichen Vulnerabilität und der aktuellen Nutzung von diesem Ort ausgeht [11]. Dieses Vorgehen ermöglicht es, für eine Grundwasserfassung ein *Risikomanagement* umzusetzen, welches auch potentielle Gefährdungen des Grundwassers ausserhalb der Schutz zonen berücksichtigt.

Die Qualität des schweizerischen Grundwassers ist im Allgemeinen gut, wie die jüngsten Ergebnisse der *Nationalen Grundwasserbeob-*

achtung NAQUA erneut zeigen [7]. Dies ist in erster Linie den Massnahmen des Gewässerschutzes, insbesondere dem Schutzzonenkonzept und der Anwendung geeigneter Methoden zur Schutzzonenausscheidung, wie z.B. der Vulnerabilitätskartierung, zu verdanken [33]. Weitere Herausforderungen an den Grundwasserschutz im Allgemeinen und das Konzept der Vulnerabilität im Speziellen könnten etwa mit dem Auftreten neuer Schadstoffe [34] oder dem Klimawandel entstehen. Dessen Folgen könnten sowohl ein erhöhter Nutzungsdruck auf das Grundwasser als auch ein häufigeres Auftreten von Starkniederschlägen und Hochwasserereignissen sein [35], was zu einer Erhöhung der Vulnerabilität von Grundwasservorkommen führen kann [26, 36]. Solche Entwicklungen sind in Zukunft vermehrt zu berücksichtigen.

Literaturverzeichnis

- [1] Hartmann, D.; Meylan, B.; Jordi, B. (2008) Management des Grundwassers in der Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 0806, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 40 S.
- [2] GSchG (1991) Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG, SR 814.20).
- [3] GSchV (1998) Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV, SR 814.201).
- [4] BUWAL (2004) Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 141 S.
- [5] Schürch, M.; Kozel, R.; Jemelin, L. (2007) Hydrogeological mapping in Switzerland. *Hydrogeology Journal*, 15, 799–808.
- [6] BUWAL, BWG (2004) NAQUA – Grundwasserqualität in der Schweiz 2002/2003, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft; Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 204 S.
- [7] BAFU (2009) Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA), Zustand und Entwicklung 2004 bis 2006. Umwelt-Zustand, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [8] Hölting, B.; Haertle, T.; Hohberger, K.-H.; Nachtigall, K.H.; Villinger, E.; Weinzierl, W.; Wrobel, J.-P. (1995) Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geologisches Jahrbuch*, C 63, 5–24.
- [9] Daly, D.; Dassargues, A.; Drew, D.; Dunne, S.; Goldscheider, N.; Neale, S.; Popescu, I.C.; Zwahlen, F. (2002) Main concepts of the «European approach» to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10, 340–345.
- [10] Philipp, R.; Flury, F.; George, M.; Kempf, T.; Kozel, R.; Lützenkirchen, V.; Matousek, F.; Sinreich, M.; Tissières, P.; Tripet, J.P. (2007) Vulnerabilität der Grundwasservorkommen. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Tafel 8.7, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [11] Zwahlen, F. (Hrsg.) (2004) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, COST Action 620, European Commission, Brussels, Luxemburg, 297 S.
- [12] Sinreich, M.; Clavien, D.; Kozel, R.; Zwahlen, F. (2005) Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines karstiques et du risque de contamination – Adaptation et application des concepts européens en Suisse. *Bulletin d'Hydrogéologie*, 21, 59–85.
- [13] Vrba, J.; Zaporozec, A. (1994) Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *International Contributions to Hydrogeology*, 16, 131 S.
- [14] Gimmi, T. (2004) Verlagerung gelöster Stoffe durch den Boden ins Grundwasser. Schriftenreihe Umwelt Nr. 349, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 46 S.
- [15] Butscher, C.; Huggenberger, P. (2007) Implications for karst hydrology from 3D geological modeling using the aquifer base gradient approach. *Journal of Hydrology*, 342, 184–198.
- [16] Schudel, B.; Biaggi, D.; Derve, T.; Kozel, R.; Müller, I.; Ross, J.H.; Schindler, U. (2002) Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie – Praxishilfe. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern-Ittigen, Berichte des BWG, Serie Geologie 3, Bern, 75 S.
- [17] Brouyère, S.; Jeannin, P.-Y.; Dassargues, A.; Goldscheider, N.; Popescu, I.C.; Sauter, M.; Vadillo, I.; Zwahlen, F. (2001) Evaluation and validation of vulnerability concepts using a physical based approach. 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besançon, Sci. Tech. Envir. Mém. H. S. no 13, 67–72.
- [18] Jeannin, P.-Y.; Cornaton, F.; Zwahlen, F.; Perrochet, P. (2001) VULK: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation. 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besançon, Sci. Tech. Envir. Mém. H. S. no 13, 185–190.
- [19] Perrin, J.; Pochon, A.; Jeannin, P.-Y.; Zwahlen, F. (2004) Vulnerability assessment in karstic areas: validation by field experiments. *Environmental Geology*, 46, 237–245.
- [20] Pochon, A.; Tripet, J.P.; Kozel, R.; Meylan, B.; Sinreich, M.; Zwahlen, F. (2008) Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland. *Hydrogeology Journal*, 16, 1267–1281.
- [21] Greber, E.; Cornaz, S.; Herold, T.; Kozel, R.; Traber, D.; Metzler, A. (2005) Viren und Protozoen in schweizerischen Grundwasservorkommen. *Gas-Wasser-Abwasser*, 11/2005, 867–877.
- [22] BAFU (2008) Hydrogeologische Übersichtskarte der Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [23] Tripet, J.P. (2005) Grundwasser. In: Spreafico, M.; Weingartner, R. (Hrsg.) *Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate*. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 7, Bern, 79–100.
- [24] Hoehn, E.; Cirpka, O.A.; Hofer, M.; Zobrist, J.; Kipfer, R.; Baumann, M.; Scholtis, A.; Favero, R. (2007) Untersuchungsmethoden der Flussinfiltration – In der Nähe von Grundwasserfassungen. *Gas-Wasser-Abwasser*, 7/2007, 497–505.
- [25] Regli, C.; Huggenberger, P. (2007) Grundwasserschutz bei wasserbaulichen Eingriffen in Fließgewässer. *Gas-Wasser-Abwasser*, 7/2007, 521–528.
- [26] Schürch, M.; Kozel, R.; Sinreich, M. (2008) Schadenspotenzial und Verletzlichkeit von Grundwasser – Fallbeispiele bei Hochwasser und Starkniederschlägen. *Gas-Wasser-Abwasser*, 6/2008, 459–469.
- [27] Philipp, R.; Flury, F.; George, M.; Kempf, T.; Kozel, R.; Lützenkirchen, V.; Matousek, F.; Sinreich, M.; Tissières, P.; Tripet, J.P. (2008) Vulnerabilität der Grundwasservorkommen. Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500 000, swisstopo, Bern.
- [28] Bitterli, T.; Aviolat, F.; Brändli, R.; Christe, R.; Fracheboud, S.; Frey, D.; George, M.; Matousek, F.; Tripet, J.P. (2004) Grundwasservorkommen. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Tafel 8.6, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [29] Bitterli, T.; Aviolat, F.; Brändli, R.; Christe, R.; Fracheboud, S.; Frey, D.; George, M.; Matousek, F.; Tripet, J.P. (2007) Grundwasservorkommen. Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:500 000, swisstopo, Bern.
- [30] Pochon, A.; Zwahlen, F. (2003) Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen bei Kluft-Grundwasserleitern. *Praxishilfe, Vollzug Umwelt*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 83 S.
- [31] BUWAL (1998) Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK). *Praxishilfe, Vollzug Umwelt*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 56 S.
- [32] Doerflinger, N.; Jeannin, P.-Y.; Zwahlen, F. (1999) Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology*, 39, 165–176.
- [33] Hartmann, D. (2009) Aspekte der Wasserqualität. *Gas-Wasser-Abwasser*, 1/2009, 21–30.
- [34] Hanke, I.; Singer, H.; Mc Ardell, C.; Brennwald, M.; Traber, D.; Mural, R.; Herold, T.; Oechslin, R.; Kipfer, R. (2007) Arzneimittel und Pestizide im Grundwasser. *Gas-Wasser-Abwasser*, 3/2007, 3–12.
- [35] Schädler, B. (2008) Klimawandel – Geht uns das Wasser aus. *Gas-Wasser-Abwasser*, 10/2008, 763–769.
- [36] Sinreich, M.; Schürch, M.; Kozel, R. (2008) Grundwasser. In: Bezzola, G.R.; Hegg, C. (Hrsg.) *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 0825, 71–82.

Keywords

Grundwasser – Vulnerabilität – Schutzzonenkonzept

Adresse der Autoren

Michael Sinreich
michael.sinreich@bafu.admin.ch

Ronald Kozel, Dr. sc. nat.
ronald.kozel@bafu.admin.ch

Abteilung Hydrologie, Sektion
Hydrogeologie
Tel. +41 (0)31 324 77 58
Fax +41 (0)31 324 76 81

Benjamin Meylan, Dr. phil. nat.
benjamin.meylan@bafu.admin.ch

Reto Mural, Dr. phil. nat.
reto.mural@bafu.admin.ch

Abteilung Wasser, Sektion Grund-
wasserschutz

Bundesamt für Umwelt (BAFU)
CH-3003 Bern