

Methode zur Kartierung der Vulnerabilität

Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen in Karstgebieten



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Methode zur Kartierung der Vulnerabilität

Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen in Karstgebieten

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departementes für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

Autor

Pierre-Yves Jeannin

SISKA, Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstologie, La Chaux-de-Fonds

Arbeitsgruppe

Adrian Auckenthaler, AFUE (Basel-Landschaft)

Dieter Böhi, Kellerhals+Haefeli (Bern)

Simona Bronzini, SPAAS (Bellinzona)

Vivian Gremaud, SEN (Sion)

Rainer Hug, AFU (Solothurn)

Sybille Kilchmann, Marc Schürch, BAFU (Bern)

Pierre Christe, ehemals SEN (Sion)

Alain Pochon, AquaGeo (Auvernier)

Michael Sinreich, ehemals BAFU (Bern)

François Zwahlen, ehemals CHYN (Neuchâtel)

Layout

Ruben Burn, BAFU

Titelbild

Weiden mit Dolinen und kleinen Schluckstellen, Combe des Bagnines, Waadtländer Jura

© Rémy Wenger, SISKA

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uw-2510-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar.

Die Originalsprache ist Französisch.

© BAFU 2025

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----------|
| <u>Methode zur Kartierung der Vulnerabilität</u> | 1 |
|---|----------|

| | |
|-------------------------|----------|
| <u>Abstracts</u> | 5 |
|-------------------------|----------|

| | |
|-----------------------|----------|
| <u>Vorwort</u> | 6 |
|-----------------------|----------|

| | |
|----------------------------|----------|
| <u>1 Einleitung</u> | 7 |
|----------------------------|----------|

| | |
|---|---|
| 1.1 Hintergrund | 7 |
| 1.2 Rechtlicher Rahmen | 9 |
| 1.3 Vulnerabilität von Grundwasserfassungen bei Schadstoffbelastung | 9 |

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| <u>2 Allgemeines zum Karst</u> | 11 |
|---------------------------------------|-----------|

| | |
|---|----|
| 2.1 Grundwasserfliesssysteme im Karstgebiet und ihre Vulnerabilität | 11 |
|---|----|

| | |
|---|-----------|
| <u>3 Wahl der Bewertungsmethode</u> | 14 |
| 3.1 Einleitung | 14 |
| 3.2 Karst- oder Kluft-Grundwasserleiter | 14 |
| 3.3 Stark oder schwach heterogene Karst-Grundwasserleiter | 15 |

| | |
|---|-----------|
| <u>4 Bestimmung der Vulnerabilität im stark heterogenen Karstgebiet und Überführung in Grundwasserschutzzonen (EPIK 2.0)</u> | 16 |
|---|-----------|

| | |
|--|----|
| 4.1 Ausgangslage, Unterschied zwischen EPIK 1.0 und EPIK 2.0 | 16 |
| 4.2 Grundsatz | 17 |
| 4.3 Parameter I (Infiltrationsverhältnisse) | 19 |
| 4.4 Parameter P (Protektion, Deckschicht) | 25 |
| 4.5 Parameter E (Epikarst) | 28 |
| 4.6 Parameter K (Karströhren) | 31 |
| 4.7 Parameterkombination und Vulnerabilitätskarten | 34 |
| 4.8 Überführung in Grundwasserschutzzonen und -bereiche | 36 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| <u>5 Schlussfolgerung</u> | 37 |
|----------------------------------|-----------|

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| <u>6 Literaturverzeichnis</u> | 38 |
|--------------------------------------|-----------|

| | |
|-------------------------|-----------|
| <u>7 Anhänge</u> | 40 |
|-------------------------|-----------|

Abstracts

The EPIK 2.0 method is a multi-criteria approach that helps hydrogeologists assess the amount of time it takes for water to pass between a point in a catchment area and a groundwater catchment. The nature of the epikarst (*E*), the protective cover (soil or moraine) overlying the karst formation (*P*); the conditions of infiltration, diffuse or concentrated (*I*); and the characteristics of the karstic network (*K*) are assessed and combined to produce a vulnerability map from which a map of protection zones (S1, S2, Sh, Sm and Au / Ao) within the meaning of the Waters Protection Ordinance can be created.

EPIK 2.0 ist eine Multikriterien-Methode, die der hydrogeologischen Fachperson hilft, die Fliessdauer des Wassers zwischen einem Punkt eines Einzugsgebiets und einer Grundwasserfassung zu ermitteln. Die Art des Epikarsts (*E*), die schützende Deckschicht (*P*) über der Karstformation (Protektion; Boden oder Moräne), die Infiltrationsverhältnisse (*I*; diffus oder konzentriert) und die Eigenschaften des Karstnetzes (*K*) werden bewertet und kombiniert, um eine Vulnerabilitätskarte zu erstellen, die sich in eine Gewässerschutzkarte (Zonen S1, S2, Sh und Sm sowie Bereiche Au und Ao) im Sinne der Gewässerschutzverordnung überführen lässt (GSchV).

La méthode EPIK 2.0 est une approche multicritère qui aide l'hydrogéologue à évaluer le temps de séjour de l'eau entre un point d'un bassin d'alimentation et un captage des eaux souterraines. La nature de l'épikarst (*E*), la couverture protectrice (sol ou moraine) surmontant la formation karstique (*P*), les conditions d'infiltration, diffuse ou concentrée (*I*), et les caractéristiques du réseau karstique (*K*) sont évalués et combinés pour produire une carte de vulnérabilité qui pourra être transposée en carte de zones de protection (S1, S2, Sh, Sm et Au / Ao) au sens de l'ordonnance fédérale sur la protection des eaux (OEaux).

Il metodo EPIK 2.0 è un approccio a più criteri che sostiene gli idrogeologi nella valutazione del tempo di permanenza dell'acqua tra un punto di un bacino imbrifero e una captazione di acque sotterranee. La natura dell'epicarso (*E*), la copertura di protezione (suolo o morena) che ricopre la formazione carsica (*P*), le condizioni d'infiltrazione diffusa o concentrata (*I*) e le caratteristiche della rete carsica (*K*) sono valutate e combinate al fine di ottenere una carta di vulnerabilità che può essere convertita in una carta delle zone di protezione (S1, S2, Sh, Sm e Au / Ao) ai sensi dell'ordinanza sulla protezione delle acque.

Keywords:

Karst regions, vulnerability, multi-criteria approach

Stichwörter:

Karstgebiete, Vulnerabilität, Multikriterien-Methode

Mots-clés:

régions karstiques, vulnérabilité, méthode multicritère

Parole chiave:

regioni carsiche, vulnerabilità, un approccio a più criteri

Vorwort

Die Grundwasservorkommen in Karstgebieten sind für die Wasserversorgung in einigen Regionen der Schweiz von grosser Bedeutung, z.B. im Jura, in den nördlichen Alpen und in Teilen der Südostschweiz. Die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen in diesen Gebieten ist demzufolge wichtig und erfordert eine spezifische Methode: die Kartierung der Vulnerabilität (Empfindlichkeit in Bezug auf eine Verschmutzung des Grundwassers). In den Karstgebieten sind nämlich die Fliessgeschwindigkeiten sehr heterogen, so dass auch eine weit von der Fassung entfernte Verschmutzung eine Gefahr für das gefasste Wasser darstellen kann.

Die vorliegende Publikation beschreibt die überarbeitete Methode EPIK 2.0 zur Kartierung der Vulnerabilität in stark heterogenen Karst-Grundwasserleitern. Sie ergänzt die Wegleitung «Grundwasserschutz in stark heterogenen Karst- und Kluft-Grundwasserleitern» aus dem Jahr 2022. Sie richtet sich an Fachbehörden, an beratende Geologie- und Ingenieurbüros sowie an Fachkreise in der Forschung, die in Karstgebieten Tätigkeiten ausüben und Anlagen betreiben. Die Methode EPIK 2.0 wurde unter der Leitung des Bundesamts für Umwelt BAFU in enger Zusammenarbeit mit dem «Schweizerischen Institut für Speläologie und Karstologie SISKA» und einer Arbeitsgruppe – bestehend aus Mitarbeitenden von Behörden, Wissenschaft, und Geologie- und Ingenieurbüros – erarbeitet.

Die überarbeitete Methode EPIK 2.0 kommt dem Bedürfnis nach einer praxistauglichen und einheitlichen Methode für die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen in Karstgebieten nach. Die Methode beruht auf der Beurteilung verschiedener hydrogeologischer Kriterien, die den Schutz des Grundwassers für die verschiedenen Teilgebiete des Einzugsgebiets einer Grundwasserfassung kennzeichnen. Die Vulnerabilität wird anhand der Parameter E (Ausbildung des Epikarsts), P (Schutz durch die Deckschicht), I (Infiltrationsverhältnisse) und K (Entwicklung des Karstnetzes) ermittelt. Die Grundwasserschutzzonen werden anschliessend basierend auf der Vulnerabilität ausgeschieden.

Die überarbeitete Methode EPIK 2.0 ist für den Einsatz in einem Geografischen Informationssystem (GIS) konzipiert. Dies ist möglich, weil seit 1998 basierend auf der Methode EPIK 1.0 in vielen Feldkampagnen umfassende, geobasierte Datengrundlagen für Karstgebiete zusammengetragen wurden. Somit können nun mit EPIK 2.0 die Schutzzonen in stark heterogenen Karst-Grundwasserleitern unter weitestgehender Nutzung der vorhandenen Datensätze und mit minimaler zusätzlicher Feldarbeit ermittelt werden.

Carlo Scapozza, Leiter Abteilung Hydrologie
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

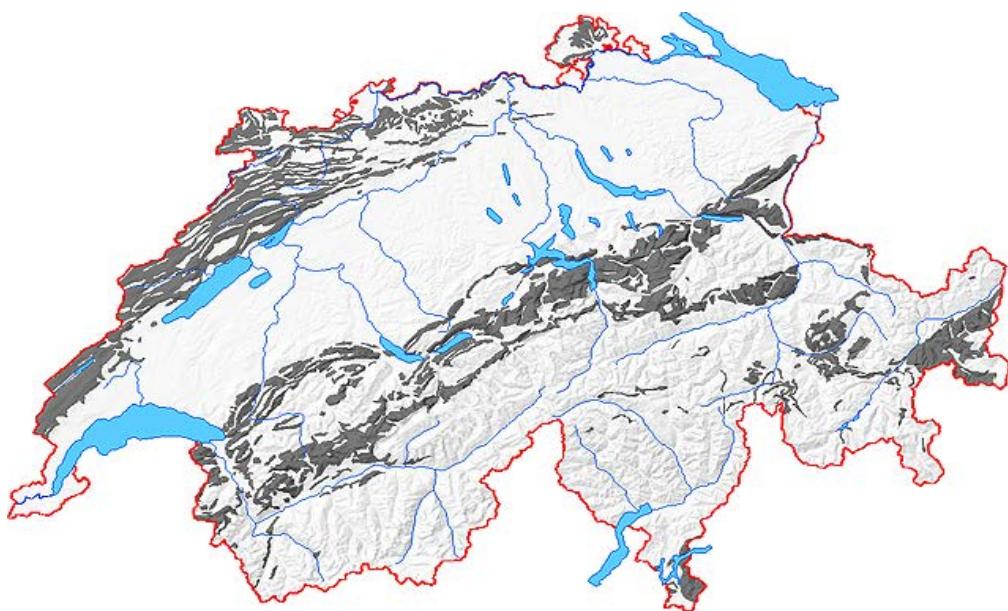
1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Karstgebiete (Abbildung 1) machen rund 20 Prozent der schweizerischen Landesfläche aus und liefern ungefähr 20 Prozent des gesamten inländischen Trinkwasservolumens. In einigen Gegenden (z. B. Kanton Neuenburg und Jura) stammt der grösste Teil des konsumierten Wassers aus diesem Grundwasserleitertyp.

Abbildung 1

Verteilung der Karstgebiete: Rund 20 Prozent der Fläche der Schweiz besteht aus verkarstetem Fels.



Im Karst fliesst das Wasser hauptsächlich durch ein natürliches Röhrennetz und kann in kurzer Zeit grosse Distanzen zurücklegen. Die Quellen weisen generell grosse Einzugsgebiete auf (mehrere Dutzend km²) und sind auch in Trockenperioden äusserst ergiebig (mehrere Dutzend bis Hundert l/s). Doch verweilt das Wasser insbesondere bei hohem Pegelstand nur kurz im Untergrund und wird nur unzureichend gefiltert, weshalb seine Qualität oft durch Bakterien, Trübstoffe und organische Substanzen beeinträchtigt ist.

Dies trifft im Wesentlichen auf die Fassungen von natürlichen Ausläufen zu, die einen grossen Anteil der heute genutzten Wasserressourcen ausmachen.

Bohrbrunnen oder Stollenfassungen aus grossen oder tief liegenden gesättigten Bereichen weisen wegen der längeren Verweilzeit (geringere Fliessgeschwindigkeit) eine stabilere Wasserqualität auf.

Aus geografischen Gründen liegen die Einzugsgebiete der Grundwasserfassungen des Karstgebiets grossteils im mittleren Gebirge, das sich durch eine extensive Bodennutzung auszeichnet (Tierhaltung, Weidewirtschaft, extensiver Anbau). Der Eintrag persistenter Schadstoffe (Pflanzenschutzmittel, Belastung durch industrielle Aktivität usw.) ist hier weniger ausgeprägt als bei anderen Grundwasserleitertypen im Talgebiet. Zudem können

sich die Schadstoffe wegen der grossen Infiltrationsrate des Niederschlagswassers und der relativ geringen Verweilzeit des Wassers im Untergrund nicht über längere Zeit ansammeln. Doch auch hier bleiben einige stark industriell und landwirtschaftlich genutzte Gegenden nicht verschont.

In den meisten Fällen wird das Trinkwasser aus Karst-Grundwasserleitern einstufig (antibakteriell) aufbereitet, bisweilen aber auch mehrstufig (Ultrafiltration, Bedeutung für die Trinkwasserversorgung, Fassungsarten).

Die Karstgebiete sind über die ganze Länge des Juras, am Alpennordhang (Voralpen und Helvetikum), in den Bündnerdecken und im Südtessin anzutreffen (Abbildung 1).

Die wichtigsten Karst-Grundwasserleiter, also die Kalkschichten, sind teils von nicht verkarsteten Formationen überdeckt, die aber bei der Grundwasserneubildung auch eine Rolle spielen. Somit sind die Karsteinzugsgebiete grösser als die Fläche der verkarsteten Aufschlüsse. Mehrere Kantone haben «Karstkarten» erstellt, welche die Verteilung der Karstaufschlüsse und der nicht verkarsteten, aber den Karst speisenden Gebiete ausweisen¹.

Für Karstgrundwasser kommen hauptsächlich drei Fassungsarten zum Einsatz:

- 1) Direkte oder indirekte Quellfassung
- 2) Stollenfassung
- 3) Förderbrunnen

Bei einer Quellfassung wird das natürliche Grundwasserfliesssystem durch die Fassung selbst kaum oder gar nicht gestört. Denn nur ein Teil des natürlich abfliessenden Wassers wird für die Trinkwasserversorgung abgeleitet.

Stollenfassungen werden im Allgemeinen unterhalb des gesättigten Bereichs angelegt, sodass dieser entwässert wird. Dadurch senkt sich der Grundwasserspiegel dauerhaft bis auf die Höhe des Schachts ab. Hier wird das natürliche unterirdische Fliesssystem durch die eingebaute Leitung gestört, was zu einer verminderten Abflussmenge oder zum Austrocknen der natürlichen Austrittsstellen führen kann.

Die Förderbrunnen fassen das Wasser ebenfalls unterhalb des natürlichen gesättigten Bereichs, doch ist dessen Absenkung generell variabel, weil die Förderung nicht kontinuierlich ist. Die Störungseinwirkung verändert sich also im zeitlichen Verlauf.

Stollenfassungen und Förderbrunnen entnehmen Grundwasser, das sich teils in den kaum durchlässigen Schichten des Kalkgesteins rund um die Karströhren befindet. Weist die Fassung aber eine nennenswerte Abflussmenge auf ($> 5 \text{ l/s}$), bedeutet dies meist, dass der Schacht oder Stollen kleinere Röhren und Risse durchquert, die gut mit dem Karströhrensystem verbunden sind, das die natürliche Entwässerung sicherstellt.

¹ In mehreren Kantonen werden die Karst-Grundwasserleiter gemäss Geoinformationsgesetz zurzeit ausgeschieden.

1.2 Rechtlicher Rahmen

Die 2016 revidierte Gewässerschutzverordnung (GSchV) hält fest, dass die Grundwasserschutzzonen *bei stark heterogenen Karst- und Kluft-Grundwasserleitern* aus den Zonen S1 und S2 sowie den Zonen Sh und Sm bestehen (*Anhang 4 Ziff. 121 Abs. 1 Bst. b GSchV, BAFU, 2022*).

Mit der Methode EPIK 2.0 soll für die Ausscheidung der Grundwasserschutzzonen und -bereiche eine Praxishilfe geboten werden, die sich auf die stark heterogenen Karst-Grundwasserleiter beschränkt. Für die stark heterogenen Kluft-Grundwasserleiter ist die DISCO-Methode (Pochon & Zwahlen, 2003) anzuwenden.

In Anhang 4 GSchV werden auch die Qualitätsziele und die Vorgaben für die vier Schutzzonen (S1, S2, Sh, Sm) und zwei Schutzbereiche (Au, Ao) bei Karst-Grundwasserleitern bestimmt.

Gemäss diesem Anhang soll die Schutzzone S1 bei stark heterogenen Karstgebieten nicht nur die Fassungsumgebung (allgemeingültige Vorgabe), sondern auch Schluckstellen (konzentrierter Oberflächenwassereintrag) und ihre unmittelbare Umgebung umfassen (Details in Anhang 4).

Laut Definition in Anhang 4 umfasst die Zone Sh «die Gebiete von hoher Vulnerabilität», die Zone Sm «die Gebiete von mindestens mittlerer Vulnerabilität im Einzugsgebiet einer Grundwasserfassung». Dies bedeutet, dass die Ausscheidung auf der Ermittlung der Vulnerabilität beruht, deren Begrifflichkeit in der GSchV und ihren Anhängen aber nicht ausdrücklich vorgegeben ist.

Darum wird im nachfolgenden Kapitel der Begriff der Vulnerabilität definiert, während in Kapitel 4.8 die Vulnerabilitätsklassen gering, mittel und hoch erläutert werden.

Der Begriff der stark heterogenen Karst- und Kluftgebiete wird in BAFU (2022) definiert und in Kapitel 2 entsprechend wiedergegeben.

Im gleichen Dokument werden auch die Bestimmungen und Auflagen, die für Schutzzonen im stark heterogenen Karstgebiet gelten, beschrieben (BAFU, 2022).

1.3 Vulnerabilität von Grundwasserfassungen bei Schadstoffbelastung

Der Begriff der Vulnerabilität wird in der Literatur äusserst unterschiedlich definiert und verwendet. In der Hydrogeologie und besonders in den Gesetzen und Empfehlungen zum Schutz von Trinkwasserfassungen hat sich folgende Definition durchgesetzt: «Die Vulnerabilität ist eine intrinsische Eigenschaft der Grundwasserleiter, die von deren Empfindlichkeit gegenüber natürlichen und anthropogenen Einwirkung abhängt» (Gilbrich & Zaporozec, 1994). Es handelt sich um eine nicht direkt messbare Eigenschaft, die für jeden Punkt eines Fassungs- oder Quelleinzugsgebiets bestimmbar sein muss. Sie wird anhand von geologischen und hydrogeologischen Daten abgeschätzt. Dabei werden drei Faktoren berücksichtigt (Brouyères et al., 2001, Jeannin et al., 2001): die natürliche Schadstoffminderung (Höchstkonzentration), die Verweilzeit (Fließdauer von der Infiltration bis zur Fassung) und bis zu einem gewissen Grad auch die Dauer der Verschmutzung.

Das Konzept der Vulnerabilität wurde in Verbindung mit einem zeitlich und räumlich punktuellen Verschmutzungsszenario entwickelt: übermässiger Gülleeintrag auf einem Landstück, Unfall mit einem Kohlenwasserstoff-Tankwagen oder Leck an einem Giftstofftank. Ziel ist die Ermittlung der Punkte in einem Fassungseinzugsgebiet, von denen bei einem Unglück die grösste Verschmutzungsgefahr ausgeht. Eine geringe Vulnerabilität besteht dann, wenn der Schadstoff stark gemindert wird und erst mit grossem zeitlichem Abstand bis zur Fassung oder zur Quelle gelangt und diese nur für kurze Zeit verschmutzt. Dagegen ist insbesondere dann von einer hohen Vulnerabilität die Rede, wenn der Schadstoff die Fassung schnell und konzentriert erreicht.

Es wird darauf hingewiesen, dass es bereits die Karte «Vulnerabilität der Grundwasservorkommen» im Massstab 1:500 000 gibt. Diese bildet die Empfindlichkeit der Grundwasservorkommen für mögliche Schadstoffgefährdungen auf Landesebene ab. Basis ist ein Multikriterien-Modellansatz, der sich der Karte der Grundwasservorkommen, der Bodeneignungskarte und weiterer hydrogeologischer Grundlagen bedient. Der Modellansatz zur Bestimmung der Vulnerabilität in Festgesteinen beruht primär auf der Schutzwirkung des Bodens und, wo bekannt, auf der Schutzwirkung einer kaum durchlässigen Lockergesteinsdecke. Geklüfteten, teils verkarsteten Festgesteinen wird generell eine schwache bis mässige Schutzwirkung zugeordnet. Die in der Karte 1:500 000 angewendete Methode zur Bestimmung der Vulnerabilität von Grundwasserleitern unterscheidet sich also von EPIK 2.0 und ist deutlich vereinfacht. Die Ergebnisse lassen sich darum nicht unmittelbar vergleichen.

2 Allgemeines zum Karst

Karst zeichnet sich durch eigene Landschafts- und Hydrologieformen aus, die von der Lösung des Felsgesteins durch Niederschlags- und Grundwasser geprägt ist. In der Schweiz liegen die meisten Karstgebiete in Kalk, lokal aber auch in Dolomit, Gips und Salz.

Zum morphologischen Formenschatz des Karsts gehören Dolinen, Karrenfelder, Trockentäler, Höhlen und Schächte. Hydrologisch zeigt sich die durch Lösungsphänomene bedingte Durchlässigkeit mit fehlenden oberirdischen Fließgewässern, ergiebigen Quellen in den Tälern sowie Bachläufen, die im Untergrund verschwinden.

Diese charakteristischen Eigenschaften sind mehr oder weniger augenfällig. Wenn sie nicht eindeutig erkennbar sind, heisst dies keinesfalls, dass kein Karst vorliegt. Solange keine Evidenz besteht, dass ein Karbonat- oder Gipsmassiv nicht verkarstet ist, muss davon ausgegangen werden, dass genügend Zeit für die lösungsbedingte Entwicklung eines Karstsystems vorhanden war. Darum stellt der in der Verordnung vorgesehene Fall schwach heterogener Karst-Grundwasserleiter eine Ausnahme dar, der durch gezielte Tests und Datenerhebungen validiert werden muss.

2.1 Grundwasserfliesssysteme im Karstgebiet und ihre Vulnerabilität

2.1.1 Grundwasserfliesssysteme

Die «Karstquelle» ist oft das entscheidende Element eines Karstmassivs, das sich am einfachsten nachweisen lässt, weil sie meist punktförmig und spektakulär ist. Doch kann sie auch mehrere Austritte aufweisen und in Tälern unter den Flussablagerungen liegen.

Das Einzugsgebiet von Karstquellen ist im Allgemeinen grossflächig und beträgt in der Schweiz typischerweise 1 bis 100 km². Dies führt zu erheblichen Abflussmengen zwischen einigen Dutzend Litern und mehreren Dutzend Kubikmetern pro Sekunde. Das Hydrogramm von Karstquellen ist oft variabel mit raschem, heftigem Anstieg und rascher Abnahme bei Hochwasser und in Trockenzeiten langsamem Versiegen. Vielfach ist auch die Wasserqualität variabel und stark von der Abflussmenge abhängig.

Das Grundwasserfliesssystem entspricht den vielen unterschiedlichen Wegen, über die das Wasser vom Einzugsgebiet bis zur Quelle gelangt. In verkarsteten Massiven folgt der Wasserstrom einem Röhrensystem, das die Hauptlast des Wassers aufnimmt (Abbildung 2). Dieses Netz besteht aus natürlich gebildeten Rinnen, die das Wasser zu den punktförmigen, wenigen Austritten (Karstquellen) ableitet. Unterhalb der Austritte ist das Netz gesättigt. Die Röhren folgen bis zum Austritt in der Regel dem Weg des geringsten hydraulischen Widerstands. Bei Hochwasser steigt das Wasser in den Karströhren oft mehrere Dutzend Meter an und setzt die subhorizontalen Röhren (epiphreatischer Bereich) unter Wasser, die bei Niedrigwasser trocken sind. Darüber, im vadosem oder ungesättigten Bereich, verlaufen die Röhren generell vertikal und bringen das infiltrierende Wasser bis zum gesättigten bzw. zum Schwankungsbereich. Die Infiltration in Karstmassiven ergibt sich, wenn Bäche oder Flüsse in punktuellen Schluckstellen verschwinden, die senkrecht zum gesättigten Bereich hin abfallen. Dies ist aber ein Extremfall. In den meisten Systemen erfolgt die Infiltration diffus: Die Kalkoberfläche ist verwittert (sie weist Risse, Spalten und kleinere Röhren auf) und bildet einen Epikarst, der in kurzer Zeit grosse

Niederschlagsmengen aufnehmen kann. Der Epikarst wird durch vertikale Röhren entwässert, in denen das Wasser durch den ungesättigten Bereich bis zu den Röhren des gesättigten Bereichs hinunterfällt und von da bis zum Austritt horizontal fliesst (siehe Schema in Abbildung 3). Das Karstnetz bildet sich also natürlich durch Lösung und bietet dem Regenwasser einen möglichst einfachen Weg bis zu den Austritten.

Jedoch erfolgt die Entwässerung nicht unmittelbar. Ein Teil des Wassers verbleibt temporär im Grundwasserleiter (Abbildung 2), der im Wesentlichen zwei Formen annimmt:

- kaum durchlässige Kalksteinsbereiche, die das Karstnetz im gesättigten und im Schwankungsbereich umgeben;
- kaum durchlässige, bei Niedrigwasser schwebende Bereiche im Epikarst und im ungesättigten Bereich.

Diese Festgesteinsbereiche stützen die Abflussmenge der Karstaustritte bei Niedrigwasser, sodass diese ohne Neubildung mehrere Monate lang aktiv bleiben.

2.1.2 Verweilzeit und Vulnerabilität

Eine Schadstoffbelastung kann bei Hochwasser also äusserst rasch (in der Regel wenige Stunden bis Tage) von einem Punkt des Einzugsgebiets bis zur Karstquelle gelangen, in Trockenperioden dagegen deutlich langsamer (oft mehrere Monate). Diese Schwankungen fallen bei Schluckstellen, an denen auch bei niedrigem Stand Wasser fliesst, ganz anders aus als bei diffuser Infiltration. Hier kommt der Abfluss des Sickerwassers durch den Boden und den Epikarst in den ungesättigten Bereich bisweilen über mehrere Wochen praktisch zum Erliegen. Für die Auswertung mit EPIK 2.0 gilt, falls kein anderer Anlass besteht, ein Referenzszenario mit mittlerem Wasserstand.

Die Schluckstellen führen daher in jedem Fall (Hoch- und Niedrigwasser) zu einem relativ raschen Abfluss in Richtung Karstaustritte. Die Verweilzeit und die Verdünnung (Schadstoffminderung) sind also vom Abstand zwischen der Schluckstelle und den Austritten sowie vom Anteil der Schluckstelle an der gesamten Abflussmenge des Karstsystems abhängig.

Auch im natürlichen Zustand weist die Wasserqualität eines Karstsystems gewisse Schwankungen auf. Zwar kommen Schadstoffe wie Kohlenwasserstoffe und chlorhaltige Lösungsmittel grundsätzlich nicht vor, doch lassen sich regelmäßig, meist im Zusammenhang mit Hochwasserperioden, Belastungen durch Bakterien, organische Substanzen usw. nachweisen.

In jedem Fall ist die Rückhalte- und Filterkapazität des Systems entscheidend dafür, wie viele Schadstoffe wie einfach zur Grundwasserfassung gelangen. Genau diese Grösse bildet der Vulnerabilitätsindex ab.

Die Grenze des hier beschriebenen Ansatzes besteht darin, dass ein Schadstoff, der an einem als mässig vulnerabel eingestuften Standort eindringt, die Grundwasserfassung zwar nicht erheblich belastet, bei gleichzeitiger Infiltration an mehreren mässig vulnerablen Orten im Endeffekt die Trinkwasserqualität aber durchaus beeinträchtigt. Der Ansatz bietet also Schutz vor Belastungen, die zeitlich und räumlich punktuell sind. Weiter ist zu beachten, dass einige Schadstoffe im Grundwasserleiter durch Abbau und Adsorption tatsächlich gemindert werden, während andere lediglich verzögert und gestreut werden. Weil die intrinsische Vulnerabilität die Unterschiede zwischen den Schadstoffen grundsätzlich nicht berücksichtigt, wird in erster Linie das Streuungs- und Verdünnungspotenzial berücksichtigt.

Abbildung 2

Links: Schema des Wasserabflusses in verschiedenen hydrogeologischen Bereichen eines Karst-Grundwasserfließsystems:

Boden, Epikarst, ungesättigter, epiphreatischer, gesättigter Bereich.

Rechts: Schema der Teilsysteme und ihrer Wechselwirkungen.

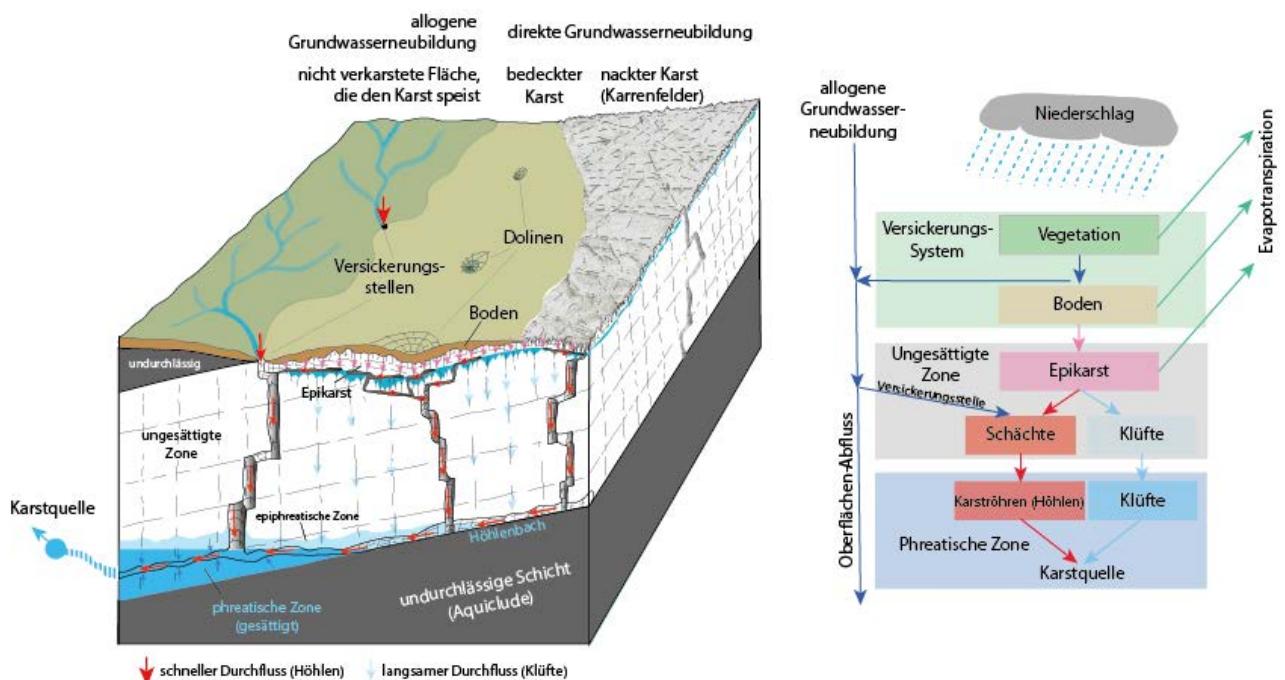
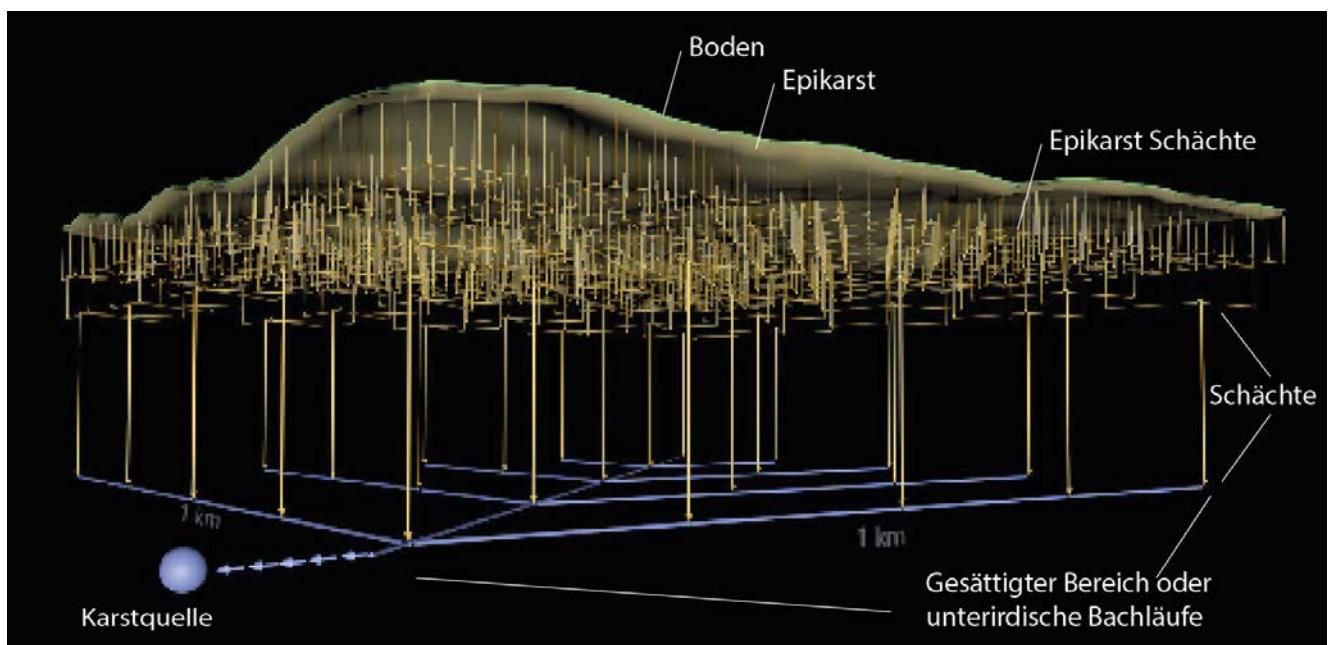


Abbildung 3

Schema eines Karströhrensystems unter einem 1 km² grossen Karstgebiet.



3 Wahl der Bewertungsmethode

3.1 Einleitung

Die Gewässerschutzverordnung (GSchV) unterscheidet zwischen Karst- und Kluft-Grundwasserleitern, die schwach oder stark heterogen sein können.

Die Praxishilfe «Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen bei Kluft-Grundwasserleitern» (Pochon & Zwahlen, 2003) deckt die stark und schwach heterogenen Kluft-Grundwasserleiter ab (DISCO-Methode).

Die hier vorgestellte Methode EPIK 2.0 ist auf die stark heterogenen Karst-Grundwasserleiter anwendbar. Im Kapitel 3.3 wird dargelegt, wie die schwach heterogenen Karst-Grundwasserleiter zu behandeln sind.

Darum ist es sinnvoll, die Unterscheidung zwischen Kluft- und Karst-Grundwasserleitern und bei Letzteren zwischen stark und schwach heterogenen eindeutig zu ziehen (Kap. 3.2).

3.2 Karst- oder Kluft-Grundwasserleiter

Das Auseinanderhalten von Karst- und Kluft-Massiven ist nicht immer einfach. Objektives Unterscheidungsmerkmal ist das Vorhandensein von Karströhren, also eines durch natürliche Lösung entstandenen Netzes von Rinnen mit einem Durchmesser von über 1 cm (Klimchouk et al., 2000). Dieses Kriterium klingt simpel, doch gestaltet sich die Feststellung dieses Merkmals in der Praxis deutlich schwieriger. Verkarstungsfähiges Gestein wird in geologisch relativ kurzen Zeiträumen verkarstet. Darum wird bei der Bestimmung, ob ein Massiv verkarstet ist oder nicht, im Wesentlichen nach lithologischen Gesichtspunkten vorgegangen. Anhang 1 umfasst eine unverbindliche Liste über die Verkarstungsfähigkeit der wichtigsten geologischen Formationen der Schweiz.

Generell ist davon auszugehen, dass Kalk und Dolomit verkarstet sind, zumindest wenn sie seit mehreren Zehntausend Jahren aufgeschlossen sind (Niederschläge). Somit stellt das nicht verkarstete Karbonatgestein eine Ausnahme dar und hat als Kluftmassiv zu gelten. Dies muss aber mit Feldbeobachtungen bestätigt werden. Gips und Salz sind zwar grundsätzlich verkarstet, wegen ihrem grossen Gehalt an gelösten Ionen aber nicht für die Trinkwassergewinnung geeignet.

Silikatgestein wie Gneis, Granit, Quarzit, Arkose usw. ist generell als nicht verkarstet einzustufen. Zwar ist ihre Verkarstung nicht ausgeschlossen, erfordert aber einen äusserst langen Aufschluss (mehrere Hundert Millionen Jahre), der mit dem schnellen Wandel in der schweizerischen Berglandschaft unvereinbar ist.

Sandstein und Mergel mit ihrem nicht zu vernachlässigenden Karbonatanteil liegen in einem Zwischenbereich. Lösungssphänomene spielen hier zwar eine Rolle, doch ist nicht immer klar, ob sich auch wirklich ein kilometerlanges eigentliches Karstnetz entwickeln kann. Bei diesen Gesteinsarten kommt der feldkundigen hydrogeologischen Fachperson ein grosser Ermessensspielraum zu. Sie muss beurteilen, ob EPIK 2.0 oder

DISCO angemessener ist oder ob das Gebiet als schwach heterogen zu gelten hat. Für solche Fälle stellt der Ansatz in (Pochon & Zwahlen, 2003) eine gute Basis dar. In diesen Gebieten mit ihrer generell mächtigeren Deckschicht als über reinem Kalk scheint eine Anwendung von EPIK 2.0 unwahrscheinlich.

3.3 Stark oder schwach heterogene Karst-Grundwasserleiter

Die Verkarstung führt gezwungenermassen zu einer äusserst heterogenen Durchlässigkeit, die von den stark durchlässigen Karströhren bis zur nahezu undurchlässigen Felsmatrix reicht. Die GSChV geht implizit von Gebieten aus, die zwar verkarstet sind, in denen die Verweilzeit im Untergrund jedoch lang ist und im Allgemeinen von der Distanz bis zum Austritt abhängt. Dies kommt für gewisse, äusserst poröse Kalkgesteine (z. B. Kreide), für Sandstein mit kalkigem Zement und grosser Matrixporosität und eventuell für einen äusserst porösen Dolomit in Frage. Doch treten solche Formationen in der Schweiz kaum auf, auch wenn sie nicht ganz ausgeschlossen sind. Hier ist es ratsam, die Schutzzonen mit der DISCO-Methode gemäss (Pochon & Zwahlen, 2003) auszuscheiden. Das Ergebnis mit DISCO fällt nicht fundamental anders aus als mit EPIK 2.0, insbesondere wenn im Einzugsgebiet keine Schluckstellen vorliegen (diffuse Infiltration).

Bei Kalkmassiven ist also grossmehrheitlich von starker Verkarstung und Heterogenität auszugehen. Auch Dolomit, Kreide und Sandstein mit kalkigem Zement sind im Prinzip verkarstet, können aber zu geklüfteten Systemen mit erheblicher Matrixporosität neigen, was den Ausschlag geben könnte, eher die DISCO- oder die Isochron-Methode anzuwenden (Pochon & Zwahlen, 2003).

4 Bestimmung der Vulnerabilität im stark heterogenen Karstgebiet und Überführung in Grundwasserschutzzonen (EPIK 2.0)

4.1 Ausgangslage, Unterschied zwischen EPIK 1.0 und EPIK 2.0

Die Methode zur Kartierung der Vulnerabilität EPIK 1.0 (Doerfliger & Zwahlen, 1998) wurde als Instrument zur Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen entwickelt, das auf die Hydrogeologie des Karstgebiets zugeschnitten ist. Die Weiterentwicklung der gewässerschutzspezifischen Gesetze und Verordnungen auf Bundesebene, insbesondere die Einführung der Zonen Sh und Sm, sowie die Praxiserfahrung aus konkreten Anwendungsfällen und die fortgeschrittenen Kenntnisse im Bereich der Hydrogeologie von Karstsystemen erfordern Anpassungen an der ursprünglichen EPIK-Methode.

Betroffen sind hauptsächlich die Bewertung der Parameter und ihre Kombination:

1. Die Kombination der Parameter berücksichtigt die Fliesswege zwischen der Oberfläche (Infiltrationsbereich) und der zu schützenden Wasserfassung besser.
2. Die schützende Deckschicht (Parameter P) wird genauer charakterisiert, weist neu drei Durchlässigkeitsklassen auf und berücksichtigt die Mächtigkeit präziser.
3. Die Schutzwirkung des Epikarsts (Parameter E) wird vorsichtiger bewertet und besser dokumentiert, wenn keine verkarstete Morphologie vorliegt.
4. Die Infiltrationsverhältnisse (Parameter I) werden in zwei Schritten bestimmt: 1. Lokalisierung der konzentrierten Infiltrationsbereiche; 2. Bestimmung der Bodenflächen, aus denen sie durch Oberflächenabfluss gespeist werden.
5. Die Schutzwirkung des Karstnetzes (Parameter K) wird im Wesentlichen aufgrund der geschätzten Verweilzeit, also der Fliessdistanz des Wassers bestimmt.

Das Konzeptmodell über die Verhältnisse im Karst (Kap. 2), das bei der Entwicklung der Methode als Grundlage diente, wurde nicht grundlegend geändert, hingegen wurde die Art und Weise, wie die Parameter bewertet werden, angepasst. Nachstehend werden die angewendeten Grundsätze sowie die Bewertungsart der vier Parameter vorgestellt.

Die EPIK-Methode 1.0 aus dem Jahr 1998 beruhte hauptsächlich auf einer feldbasierten Kartierung der drei Parameter E, P und I. Bei EPIK 2.0 besteht der erste Schritt darin, die vier Parameter E, P, I und K anhand der vorhandenen Datengrundlagen in einem GIS zu kartieren. Dabei zeigt sich deutlich, welche Daten unzureichend sind, insbesondere was das Vorhandensein und die Lokalisierung von Schluck- und Sickerstellen anbelangt. Die Feldarbeiten dienen zur Ergänzung der fehlenden Informationen und in einem weiteren Schritt auch zur Verifizierung der erstellten Karten.

4.2 Grundsatz

Voraussetzung für die Anwendung der Methode EPIK 2.0 ist die Bestimmung des Einzugsgebiets der Quelle oder der Fassung. Anhang 2 weist das diesbezügliche Vorgehen aus.

Mit dem Ansatz der Kartierung der Vulnerabilität (Abbildung 4) wird für jeden Punkt des Einzugsgebiets ein Schutzfaktor bestimmt. Dieser berücksichtigt den Fliessweg des Wassers von der Oberfläche bis zur Trinkwasserentnahme (Abbildung 5). Der Schutzfaktor ist im Wesentlichen proportional zur Fliessdauer des Wassers, die für die Schadstoffminderung ausschlaggebend ist, zur Zeitdauer, bis die Verunreinigung zur Fassung gelangt, und zur Dauer der potenziellen Schadstoffbelastung.

Entsprechend der Verhältnisse im verkarsteten Abflussystem hängt die Vulnerabilität von folgenden Faktoren ab:

1. Infiltrationsverhältnisse (Schluckstelle, eher rasche oder langsame diffuse Infiltration)
2. Fliessdauer durch die Teilsysteme
3. Verdünnung des Schadstoffs in der Gesamtwassermenge des Systems

Abbildung 4

Prinzipschema der EPIK-Methode gemäss Wegleitung Grundwasserschutz (BUWAL 2004).

Die Zonen S1 bis S3 entsprechen nicht mehr den aktuellen Vorgaben.

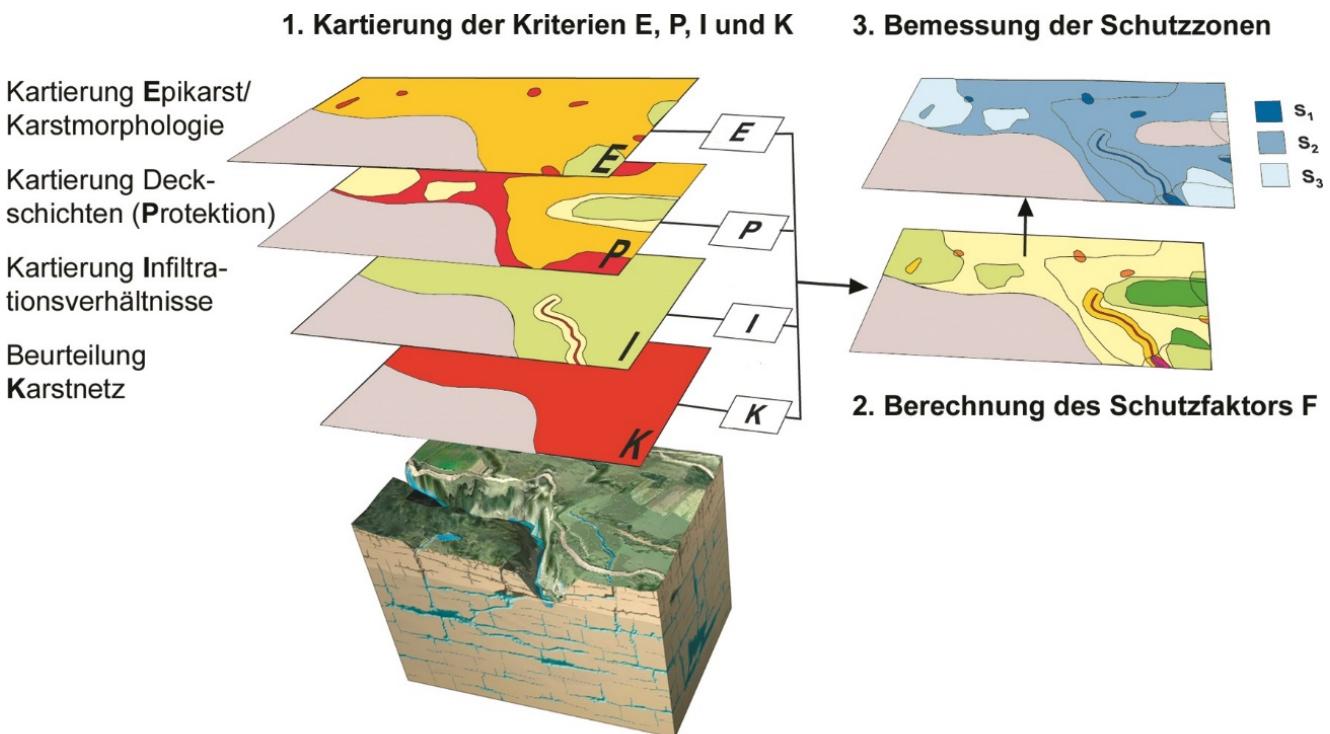
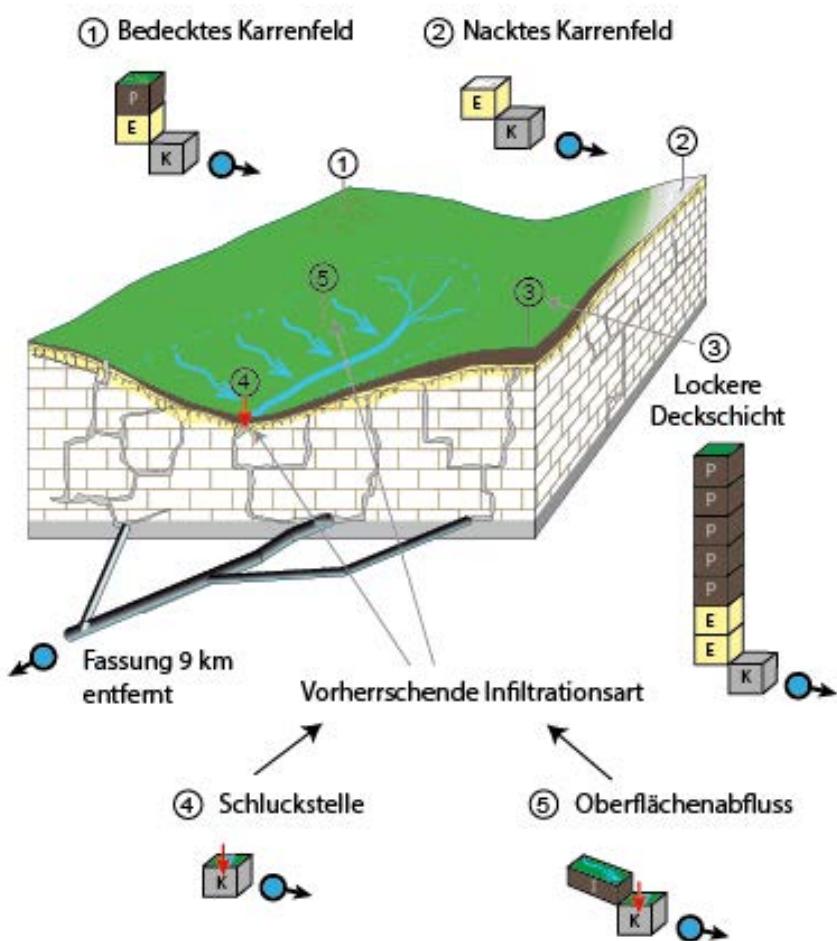


Abbildung 5

Prinzip der Methode EPIK 2.0: Bewertung des «Schutzfaktors», der sich aus den vom Wasser durchflossenen Teilsystemen zwischen einem Einzugsgebietspunkt und der Fassung ergibt.



Die Infiltration ist vor allem abhängig vom Vorhandensein von Schluckstellen. Bei diffuser Infiltration sind die Eigenschaften des Bodens über dem Kalkgestein sowie des Epikarsts ausschlaggebend. Die Fliessdauer wird also durch die Bodeneigenschaften (P), den Epikarst (E), das Karstnetz und dessen Verbindung mit der Fassung (K) bestimmt. Bei konzentrierter Infiltration (Schluckstellen) werden die Teilsysteme Boden und Epikarst umgangen und sind nicht zu berücksichtigen. Der Parameter I beschreibt also, wie das Wasser infiltriert und inwiefern die Parameter P und E zu berücksichtigen sind. In jedem Fall ist die Verdünnung der Schadstoffkonzentration direkt proportional zum Anteil der Abflussmenge der Quelle, den der belastete Punkt zum Gesamtsystem beiträgt. Bei grossen Einzugsgebieten ist die Verdünnung grösser als bei kleinen.

4.3 Parameter I (Infiltrationsverhältnisse)

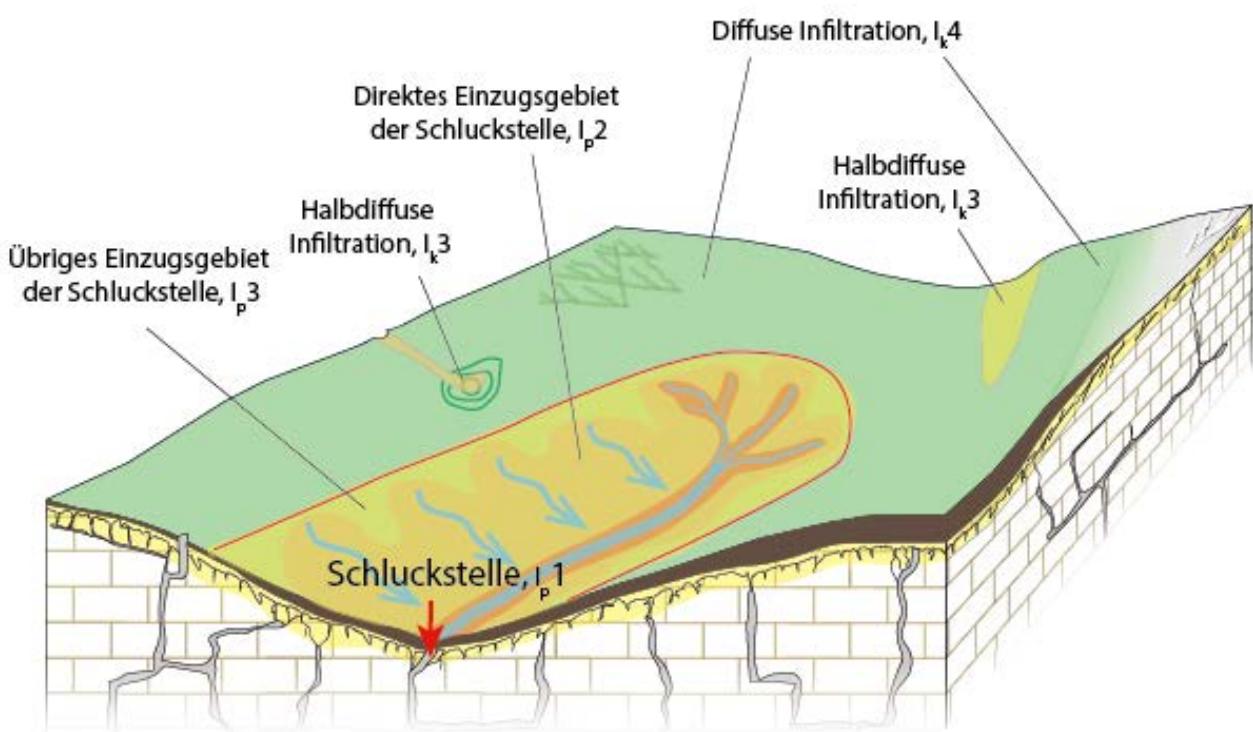
4.3.1 Grundsatz

In den meisten Fällen sind die aufgeschlossenen oder mit Boden überdeckten Kalkgesteine ausreichend durchlässig, um alle Niederschläge aufzunehmen.

Abbildung 6

Die Infiltration im verkarsteten Einzugsgebiet kann in zwei grosse Gruppen eingeteilt werden:

- 1) konzentrierte Infiltration (Schluckstellen mit einspeisenden Wasserläufen; I_p1 – I_p3);
- 2) diffuse Infiltration (I_k3 und I_k4).



Andererseits kommen aber auch Schluckstellen vor, also Mulden, Dolinen und Schächte, in denen ein Fließgewässer wie ein Bach oder ein Fluss unter der Erde verschwindet (I_p1). Das Wasser gelangt dabei direkt in das Karstnetz, ohne den Boden oder den Epikarst zu durchqueren. Die Infiltrationsrate ist hier generell sehr hoch (beispielsweise über 10 l/min pro m^2 noch mehrere Tage nach dem Niederschlag). In diesen Fällen beschränkt sich die Fließdauer zwischen der Schluckstelle und der Quelle oder Fassung auf die Zeit, in der sich das Wasser im Karstnetz aufhält. Dabei erfüllt das Einzugsgebiet der Schluckstelle aber eine gewisse Schutzfunktion, die zu beachten ist.

4.3.2 Modellansatz

Für die Beurteilung der Infiltrationsverhältnisse (I) ist eine Kartierung der Neubildungsart (konzentriert oder diffus) und die Beurteilung ihrer jeweiligen Schutzwirkung erforderlich (Abbildung 6, Tabelle 3).

Grundsätzlich lassen sich zwei Fälle relativ einfach unterscheiden:

1. Ein (quasi) perennierender Bach- oder Flusslauf speist die Schluckstelle (Zonen I_p , Kap. 4.3.2.1).
2. Die Infiltration im verkarsteten Fels ist diffus (Versickerung), kann aber zeitlich und räumlich konzentrierter erfolgen (Zonen I_k , Kap. 4.3.2.2).

Zwischen einer rein diffusen Versickerung und erkennlichen Schluckstellen bestehen zahlreiche Zwischenformen.

4.3.2.1 Konzentrierte Infiltration, Schluckstellen von Fließgewässern (I_p)

Bei Schluckstellen, die das Wasser ganz oder teilweise in den Untergrund ableiten, röhrt die Schutzfunktion hauptsächlich vom Fließweg des Wassers aus dem Einzugsgebiet, das über den Zwischenabfluss im Boden in das Fließgewässer gelangt. Zur Bewertung des Schutzindexes werden die Anteile des Zwischen- und des reinen Oberflächenabflusses geschätzt.

Die erste Schwierigkeit besteht darin, dass die meisten Schluckstellen nicht inventarisiert oder kartografiert sind. Es ist möglich, sich an topografischen und hydrografischen Karten zu orientieren, doch ist in der Regel eine Feldbegehung unabdingbar. Bei partiellen und temporären Schluckstellen ist das Vorgehen noch komplexer. Hier beruht die Beurteilung auf Vermutungen, die es mit (bestehenden oder durchzuführenden) Markierversuchen oder mit Abflussmessungen im Zuström- und Abstrombereich zu erhärten gilt.

Nach der Identifikation der Schluckstellen werden die speisenden Fließgewässer kartografiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Gewässersohle und das angrenzende Ufer keinen Schutz bieten (Tabelle 1). Dieser Bereich gehört zur Klasse I_p1 mit 0 Schutzenpunkten.

Zwischen den Armen von Fließgewässern und am Rand des Flussbetts (10 m ab Gewässerachse oder präziser) wird bei hohem Oberflächenabfluss 1 Schutzenpunkt pro 25 m gerechnet (Tabelle 2). Bei mässigem Oberflächenabfluss ist es 1 Punkt pro 12,5 m. Der Uferbereich (0 Schutzenpunkte) ist also standardmäßig in den 10 m ab Gewässerachse inbegriffen oder wird von der hydrogeologischen Fachperson präziser bestimmt. Die folgenden Ränder zählen zur Klasse I_p2 , deren Schutz je nach Abstand zum Gewässer mit 1 bis 8 Punkten gewertet wird. Vorbehaltlich ausserordentlicher Elemente können maximal 8 Schutzenpunkte vergeben werden, was einem Abstand von 200 bis 400 m zwischen zwei Gewässerarmen entspricht.

Das übrige Einzugsgebiet des Fließgewässers wird der Klasse I_p3 zugewiesen, deren Schutzwert 8 Punkte beträgt.

Achtung: Die Zonen I_p2 und I_p3 erstrecken sich bis zur Grenze des Einzugsgebiets der Schluckstelle. Dieses muss vorgängig von der hydrogeologischen Fachperson ermittelt werden. Im Allgemeinen entspricht es nicht dem topografischen Einzugsgebiet des Fließgewässers, sondern nur dem mässig bis schwach wasserdurchlässigen Bereich, der das Gewässer effektiv speist.

Tabelle 1**Parameter I: Schutzbpunkte im Einzugsgebiet von Sickerstellen (I1, I2)**

Geschätzte Schutzbpunkte des Einzugsgebiets bei Sickerstellen und Sickerstrecken (nur Klassen I_k). Die Bedingungen für hohen und mässigen Oberflächenabfluss ergeben sich aus Tabelle 2.

| | Schutzbpunkte | Maximale Ausdehnung |
|--|----------------------|---|
| Bett und Ufer von Fließgewässern | 0 pt | Das Bett aller Fließgewässer, die im Untergrund verschwinden. Standardmäßig 10 m ab Gewässerachse (gemäss swisstopo TLM3D). Für eine vertiefte Untersuchung kann die hydrogeologische Fachperson den effektiven Uferstandort berücksichtigen. |
| Einzugsgebiet mit hohem Oberflächenabfluss | + 1 pt pro 25 m | Im Prinzip maximal 200 m bzw. 8 Schutzbpunkte; Ausnahmen nur mit konkreten Gründen. |
| Einzugsgebiet mit mässigem Oberflächenabfluss | + 1 pt pro 12,5 m | Im Prinzip maximal 100 m bzw. 8 Schutzbpunkte; Ausnahmen nur mit konkreten Gründen. |

Bei Sickerstellen und Sickerstrecken – typischerweise ein Fließgewässer, das über mehrere Hundert Meter einen Teil der Abflussmenge verliert – wendet die hydrogeologische Fachperson denselben Ansatz an, kann dem Fließgewässer selbst aber einige Schutzbpunkte zuordnen, wenn der Wasserverlust sehr gering ist. Auch den entferntesten Gewässerteilen kann sie einige Schutzbpunkte beimessen, wenn der Bachlauf, der die Sickerstelle oder Sickerstrecke speist, sehr lange ist.

4.3.2.2 Diffuse Infiltration, Sickerstellen (I_k)

In den meisten Fällen erfolgt die Infiltration des Niederschlagswassers im Kalkgestein diffus (Versickerung; I_{k4}). Der Oberflächenabfluss ist wenig ausgeprägt und wird nur von ausserordentlichen Ereignissen wie grossen Gewittern, starker Schneeschmelze und Regen auf vereisten Böden ausgelöst. Weil sie äusserst selten vorkommen, werden sie bei der Beurteilung von Parameter I nicht berücksichtigt.

Halbdiffuse Infiltrationszonen (I_{k3}) liegen da vor, wo die Infiltration geschätzt mindestens dreimal grösser ist als die diffuse Neubildung durch Niederschlagswasser (I_{k4}). Hier ist die Schutzfunktion der Deckschicht geringer als bei diffuser Infiltration. Dies kommt im Wesentlichen am Fuss von Hangzonen vor, deren Oberflächenabfluss mässig bis hoch ist (Tabelle 2). Betroffen sind beispielsweise Moränengebiete, verdichteter Boden oder Mergelgebiete. Bei Regenereignissen kann Oberflächenabfluss auftreten, weil das Niederschlagswasser erst versickert, nachdem es eine bestimmte Distanz zurückgelegt hat. Für die Zone I_{k3} wird die Bewertung näherungsweise ermittelt, und zwar indem für die gesamte Infiltrationszone (im Allgemeinen am Hangfuss) und den sie vermutlich speisenden Abhang die Summe der Parameter E und P durch 2 geteilt wird.

Zur Zone I_{k3} gehören kaum wasserdurchlässige, über 50 m breite Hangbereiche, die zu einem Karstgebiet hingeneigt sind, sowie ein 20 m breiter Streifen am Hangfuss im Karstgebiet.

Hinweis: An gewissen Punkten kann eine äusserst konzentrierte Infiltration von zeitweise über 100 mm pro Stunde bestehen, während aber keine Anzeichen auf Oberflächenabfluss wie Fließgewässer oder das Bett eines temporären Wasserlaufs vorhanden sind. Dabei kann es sich z. B. um eine Versickerungsanlage für Sauberwasser handeln. Die hydrogeologische Fachperson muss in solchen Fällen beurteilen, ob sie diesen Bereich und deren Einzugsgebiet der Zone I_{k3}, I_{p1}, I_{p2} oder eventuell I_{p3} zuordnen will. Indessen könnte es sich

auch um den Fuss eines Hangbereichs mit hohem Oberflächenabfluss handeln (Tabelle 2): undurchlässiger Hangfuss eines Steilhangs.

Tabelle 2**Parameter I: Abschätzung des Oberflächenabflusses**

Unterstützende Tabelle zur Abschätzung des Oberflächenabflusses und der Infiltrationsverhältnisse anhand der Neigung und Durchlässigkeit des Bodens.

| Bodendurchlässigkeit | Neigung | | Klasse I |
|--|----------------------|----------------------|-----------------|
| | Klein <10% | Gross >10% | |
| Hoch ($K > 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$) | Niedrig | Niedrig | I_k4 |
| Mittel ($5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} > K > 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$) | Niedrig | Mässig ² | I_k4 / I_k3 |
| Gering ($K < 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$) | Mässig ³ | Stark ³ | I_k3 / I_p |

4.3.3 Praktische Aspekte der Ausscheidung

Der Parameter I wird nach den Grundsätzen in Tabelle 3 ermittelt. Konkret erfolgt dies in acht Schritten:

- 1) Die konzentrierten Infiltrationspunkte (vollständige oder partielle Schluckstellen) und die speisenden Fliessgewässer (I_p1) kartieren.⁴
- 2) Das hydrologische (nicht topografische) Einzugsgebiet der Schluckstellen und ihrer Fliessgewässer ausscheiden.
- 3) Die Zonen I_p2 und I_p3 in den Einzugsgebieten der Schluckstellen kartieren.
- 4) Die Zonen mit zumindest teilweise konzentrierter Infiltration kartieren, wie am Fuss kaum durchlässiger Hanglagen, deren Oberflächenabfluss laut Tabelle 2 hoch ist. Es kann sich auch um Versickerungsanlagen (Becken) für Sauberwasser handeln.
- 5) Jede Zone mit teilweise konzentrierter Infiltration der Zone I_k3 oder I_p zuordnen.
- 6) Für die Zonen I_p die Einzugsgebiete ausscheiden und die Zonen I_p1 , I_p2 und I_p3 kartieren.
- 7) Die übrigen Zonen mit halbdifuser Infiltration werden der Zone I_k3 zugeordnet.
- 8) Das restliche Einzugsgebiet der Fassung oder Quelle fällt in die diffuse Infiltrationszone I_k4 .

Die Kartografie erfolgt anhand von Feldbeobachtungen (Lokalisierung der perennierenden und temporären Schluckstellen bei Niederschlag), der Interpretation topografischer Daten (Gefälle, Verlauf perennierender und temporärer Fliessgewässer), geologischer Daten (geologische und strukturelle Karten) und pedologischer Daten (für Parameter P an der Oberfläche geschätzte hydraulische Leitfähigkeit).

² «Mässig» nur bei fehlendem Wald, sonst «niedrig»

³ Nur wenn Gebiet nicht schon im Einzugsgebiet eines Hangs berücksichtigt ist

⁴ In einem ersten Schritt geht es um eine Schätzung der potenziellen Schluckstellen anhand der GIS-Daten und der Karstkarte (infiltrierende Fliessgewässer). Grundsätzlich sollte das Vorhandensein einer Schluckstelle je nach Schutzobjekt durch Feldbegehung validiert und angepasst werden.

Tabelle 3**Infiltrationsklassen**

Beschreibung der Klassen nach Infiltrationsverhältnissen (Parameter I).

Einzugsgebiete von Schluckstellen (I_p)

| Infiltrationsart | | Kriterien | Bewertung der Schutzwerte |
|------------------|--|--|--|
| I_p1 | Direkte Schluckstelle und Fließgewässer | Schluckstelle und Fließgewässer sichtbar | E und P werden nicht berücksichtigt (0 Schutzwerte). I ist grundsätzlich gleich null, evtl. durch Abstand zu Schluckstelle gegeben. |
| I_p2 | Schluckstelle speisende Drainage | Gemäß bestehenden Drainageplänen, Feldbeobachtungen und/oder Modell des Drainagepotenzials (Agroscope-Layer) | E wird nicht berücksichtigt (0 Schutzwerte), Drainagerohre werden als Fließgewässer erachtet (0 Schutzwerte). I für entwässerte Fläche ist durch «Zeit bis Schluckstelle» (Bodenmächtigkeit über Drainage und Distanz) gegeben. |
| I_p2 | Direktes Einzugsgebiet der Schluckstelle | Gebiet im nahen Umfeld des speisenden Gewässers einer Schluckstelle | Der Schutz ist durch die «Zeit bis Schluckstelle» (Distanz und Oberflächenabfluss; Tabelle 1 und 2) gegeben und beträgt 1 bis 7 Punkte. |
| I_p3 | Indirekte Speisung der Schluckstelle | Übriges hydrologisches Einzugsgebiet der Schluckstelle | Bis zur Grenze des Einzugsgebiets beträgt der Schutz 8 Punkte. |

Infiltration im verkarsteten Fels (I_k)

| Infiltrationsart | | Kriterien | Bewertung der Schutzwerte |
|------------------|--------------------------|---|--|
| I_k3 | Halbdiffuse Infiltration | Gebiet mit mindestens 3-mal grösserer Infiltration als bei diffuser Infiltration (I_k4) | Der Schutz beträgt E + P, geteilt durch 2. |
| I_k4 | Diffus | Kein Oberflächenabfluss (übriges Fassungseinzugsgebiet) | Der Schutz ergibt sich aus E + P. |

4.3.4 Mergelgebiete und weitere Fälle

Bei Mergel- und Mergelkalkgebieten, die bisweilen auch als «halbverkarstet» bezeichnet werden, sind zwei Verhältnisse anzutreffen:

- 1) Das Wasser versickert im Wesentlichen und fliesst halbdiffus ab (I_k3).
- 2) Das meiste Wasser fliesst oberflächlich auf zwei unterschiedliche Arten ab:
 - a) Der Abfluss erfolgt ausserhalb des Einzugsgebiets, womit das Gebiet für die Studie unerheblich ist.
 - b) Der Abfluss erfolgt im Karstgebiet und speist die Fassung, wodurch das Gebiet als Einzugsgebiet einer Schluckstelle gilt (I_p2 oder I_p3).

Bei 1) ergibt sich der Schutz aus den Parametern E und P, geteilt durch 2. Die Verwitterungsschicht von Mergel weist eine gute Rückhaltekapazität auf, weshalb für halbverkarstete Gebiete ein Epikarst-Wert von E = 6 empfohlen wird.

4.3.5 Sonderfall: künstlich entwässerte Zonen (meist landwirtschaftliche Entwässerungen)

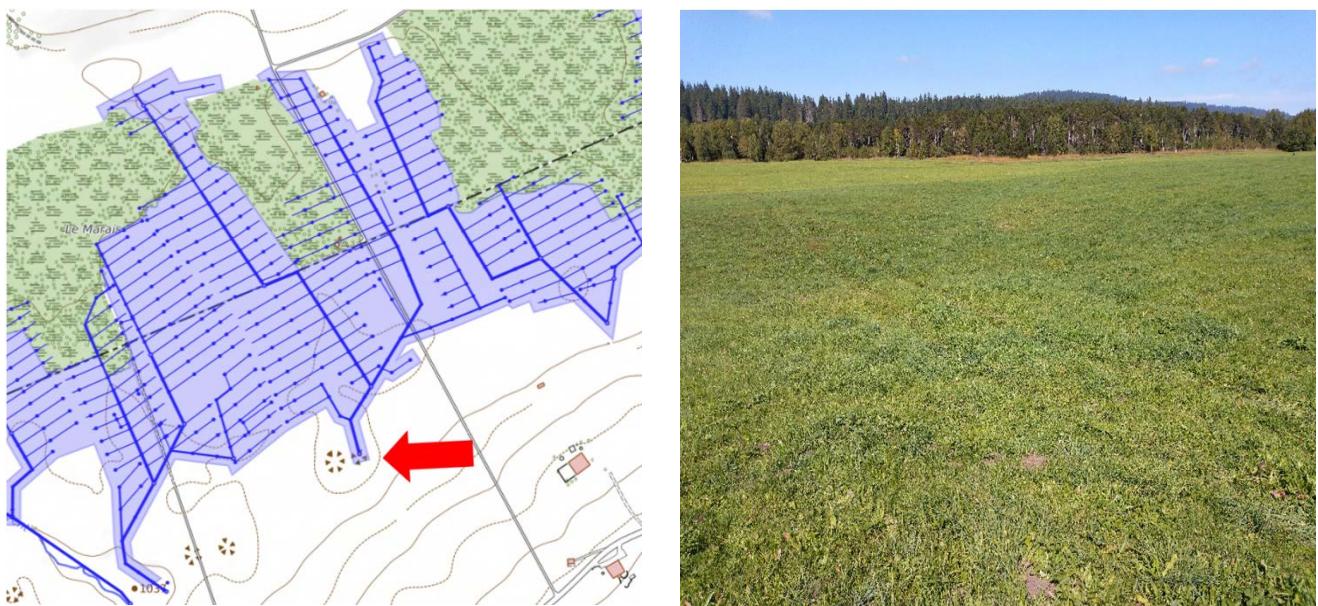
Häufig werden Feuchtgebiete zu landwirtschaftlichen Zwecken künstlich entwässert, wobei das Wasser in eine Schluckstelle abgeleitet wird. Hier wird die Mächtigkeit des Bodens geschätzt, den das Wasser bis zu den Drainagerohren durchfliesst, und der entsprechende P-Wert angewendet. Weil der Boden relativ durchlässig ist, beträgt der Schutz in den meisten Fällen 1 Punkt. Es sind aber auch 4 bis 6 Punkte möglich, wenn die Leitungen sehr tief liegen und der Boden praktisch undurchlässig ist.

Dabei sind zwei Dinge zu beachten:

- 1) Entwässerte Zonen sind oft ehemalige Moore und Torfgruben, deren Böden äusserst reich an organischen Substanzen sind. Die Entwässerung führt zur Erosion des Bodens und der organische Anteil wird im abfliessenden Wasser gelöst. Dies beeinträchtigt die Wasserqualität der Fassung oft stärker als die landwirtschaftliche Aktivität selbst.
- 2) In vielen Fällen sind die Schluckstellen entwässerter Gebiete unsichtbar, weil die Sammelleitung unter dem Landwirtschaftsgebiet verläuft und nicht immer einen Kontrollschatz aufweist. Daher müssen die landwirtschaftlichen Entwässerungspläne (die grundsätzlich auf den Geoportalen der Kantone bereitstehen) aufmerksam geprüft werden, um die Lage und Grösse des Einzugsgebiets solcher Schluckstellen zu beurteilen.

Abbildung 7

Karte der landwirtschaftlichen Entwässerungen (La Brévine-Tal) und Bild einer Doline, unter der ein Sammelleiter eine Schluckstelle speist, die mithin vollständig unsichtbar ist.



Hinweis: Die Bearbeitung von Parameter I ergibt nicht unmittelbar die Anzahl Schutzbpunkte. Der Parameter beschreibt nur, wie das Wasser in den Untergrund gelangt und wie sich die Anzahl Schutzbpunkte schätzen lassen. Eine Übersicht über alle möglichen Fälle liegt in Abbildung 9 vor. Bei konzentrierten Infiltrationen ist der Wert I generell gleich null oder sehr klein, wobei die Parameter E und P nicht berücksichtigt werden. In allen anderen Fällen dient Parameter I lediglich dazu, die Summe der Werte E + P zu modulieren.

4.4 Parameter P (Protektion, Deckschicht)

4.4.1 Grundsatz

Die schützende Deckschicht umfasst alle Schichten, die über dem Karst-Grundwasserleiter liegen und diesen schützen:

- eigentlicher Boden (Topsoil);
- lockere Ablagerungen wie Moränen, Schwemmlhm, Flussablagerungen (Subsoil);
- nicht verkarstetes Festgestein über dem Karst-Grundwasserleiter.

Die Mächtigkeit und Art der Schichten (Textur, Struktur) sind für die Fliessdauer und darum auch für die Schutzwirkung ausschlaggebend. In diesem Teil des ungesättigten Bereichs bestimmen die physikalischen Eigenschaften Wasserdurchlässigkeit, Porosität und Rückhaltekapazität, wie gut Wasser und Schadstoffe infiltrieren und gespeichert werden.

4.4.2 Modellansatz

Um die Schutzwirkung der Deckschicht für ein Karst-Einzugsgebiet zu bewerten und zu kartieren, lassen sich zwei Kriterien sinnvollerweise schätzen: die Mächtigkeit (e) und die Wasserdurchlässigkeit (k).

Tabelle 4

Parameter P: Schutzpunkte der Deckschicht

Schutzpunkte der Deckschicht (P). Sie ergeben sich aus der Summe der geschätzten Werte für Boden und Deckschicht. Ist die Deckschicht äusserst durchlässig (Hangschutt, unbedeckte Blöcke), kann ihre Punktzahl entsprechend verringert werden (z. B. max. 3 Punkte total).

| | Mächtigkeit | Durchlässigkeit | | | Bemerkungen |
|--|--|-----------------|---------|---------|--|
| | | Hoch | Mittel | Gering | |
| Topsoil (Boden) | ~0 m (unterbrochen, inexistent) | 0 | 0 | 0 | Wahrscheinlich bevorzugte Fließwege (Tierbauten, Wurzeln usw.), aber Schutz durch organischen Boden |
| | 0,1 - 0,2 m (unterbrochen, geringmächtig) | 0 | 1 | 1 | |
| | 0,2 - 0,5 m | 1 | 2 | 2 | |
| | 0,5 - 1 m | 1 | 4 | 5 | |
| Subsoil (Moräne, Schwemmlehm, nicht verkarsteter Fels, usw.) | 0,5 - 1 m | 1 | 2 | 5 | Bei unverfestigten Sedimenten bevorzugte Fließwege selten oder inexistent, bei Festgestein wahrscheinlicher |
| | 1 - 2 m | 2 | 4 | 10 | |
| | 2 - 3 m | 3 | 7 | 19 | |
| | Pro weiteren Meter | 1 pt/m | 3 pts/m | 9 pts/m | |

Tabelle 4 enthält Richtwerte für die Schutzpunkte der verschiedenen Deckschichten nach Mächtigkeit.

Die Wasserdurchlässigkeit wird geschätzt und schematisch in drei Klassen eingeteilt:

1. sehr stark durchlässig: Böden/Gelände, die stark durchlüftet sind und/oder grobe Komponenten (Schotter, Sand) aufweisen, $K > 5 \cdot 10^{-4}$ m/s;
2. mässig, «normal» durchlässig: Böden, die normal organisch sind und/oder vermischt sind, nicht zu feine Komponenten (kein Ton, wenig Lehm) aufweisen, $5 \cdot 10^{-4}$ m/s > $K > 5 \cdot 10^{-7}$ m/s;
3. sehr wenig durchlässig: Böden/Gelände mit feinen (Lehm, Ton) und/oder abgesackten Komponenten, $K < 5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Die Mächtigkeit und die Wasserdurchlässigkeit lassen sich namentlich mit folgenden Beobachtungen ermitteln:

- Geomorphologisch: Beobachtung des Geländes und Interpretation der Geodaten (digitales Höhenmodell [DHM], Luftaufnahmen, geologische und pedologische Karten, wo vorhanden);
- Sondierungen: Hand- oder Elektrobohrer, Grabungen, allfällige bestehende Sondierungsergebnisse;
- Versickerungsversuche: Bohrloch, Ausgrabung, Doppelring, Bewässerung;
- Beobachtung bei Niederschlag: Beurteilung der Infiltrationsfähigkeit, niederschlagsbedingte Neigung zu Oberflächenabfluss;
- Geophysikalisch: Sondierungen oder geoelektrische Tomographie.

Für die Wasserdurchlässigkeit kann von einem «mittleren» Wert ausgegangen werden. Eine sehr durchlässige Deckschicht ($> 5 \cdot 10^{-4}$ m/s) ist beispielsweise nicht überdeckter Hangschutt, während tonige Böden und undurchlässiges Felsgestein wenig durchlässig sind ($< 5 \cdot 10^{-7}$ m/s). Letztere fördern den oberflächlichen Abfluss und damit die Bildung von Fliessgewässern und Schluckstellen.

Die Schutzwerte für die unterschiedlichen Arten und Mächtigkeiten der Deckschicht sind in Tabelle 4 aufgeführt. Dabei wird für jeden Punkt des Einzugsgebiets grundsätzlich die Klasse des eigentlichen Bodens und der darunterliegenden Deckschicht (Subsoil und evtl. nicht verkarstetes Festgestein) bestimmt. Die Summe dieser beiden Werte entspricht den Schutzwerten der Deckschicht (P).

Bei sehr durchlässigen Deckschichten wird die Speicher- und Minderungskapazität speziell bei grossem Schadstoffeintrag schnell übertroffen, weil die Infiltrationsrate hoch ist und das Wasser wegen der erhöhten Durchlässigkeit des ungesättigten Bereichs sehr schnell erneuert wird. Bei sehr grobkörnigen Deckschichten (Hangschutt ohne feinkörnige Anteile) kommen kleinere Werte in Frage als in Tabelle 4.

Für die automatische Kartierung der Mächtigkeit der Deckschicht wird ein systematisches Vorgehen vorgeschlagen (siehe Anhang 6). Doch sind die räumliche Auflösung und die Verlässlichkeit dieser Methode in gewissen Fällen unzureichend.

4.5 Parameter E (Epikarst)

4.5.1 Grundsatz

Epikarst ist das Kalkgestein, das sich auf den ersten Metern unter der Oberfläche befindet und Verwitterungs-, Entlastungs- und Lösungssphänomene besonders stark ausgesetzt ist.

Geomorphologisch ist der Epikarst an typischen Karstlandschaftsmerkmalen wie Dolinen, Mulden und Karrenfeldern erkennbar.

Aus hydrogeologischer Sicht stellt er eine durchlässige Schicht dar, die einen wesentlichen Anteil der Niederschläge aufnehmen kann. Entwässert wird er über darunter liegende, senkrechte Schächte, durch die ein Teil der Niederschläge rasch zum Karstnetz und zur Quelle bzw. Fassung hin abfließt. Ein anderer Teil des Wassers wird manchmal mehrere Wochen lang in den weniger durchlässigen und weniger entwässerten Bereichen des Epikarsts gespeichert.

So ermöglicht der Epikarst einem Teil des infiltrierenden Wassers, rasch zum Karstnetz zu gelangen, und gleichzeitig einem anderen Teil, lange Zeit oberflächennah zu verweilen, womit es bis zu einem gewissen Grad filtriert wird. Das Speichervermögen ist also ein entscheidender Aspekt, um die Schutzwirkung des Epikarsts zu bewerten. Es hängt erheblich von den lithologischen Eigenschaften des Kalkgesteins ab. Dünnbankiger Kalk neigt zur Verwitterung und zerfällt in kleinere Blöcke und Geröll, während dickbankige Kalke einige grössere Klüfte ohne wesentliches Speichervermögen ausbilden. Je poröser der Kalk, desto grösser ist seine Frostempfindlichkeit, die gerade im Mittel- und Hochgebirge einen wichtigen Faktor für Verwitterungsphänomene darstellt. Poröserer Spatkalk (Sparit) ist oft frostempfindlicher als mikritischer Kalk.

Auch die regionale Tektonik (Brüche, Falten) beeinflusst die Ausbildung des Epikarsts und seine Entwässerung im Untergrund. Brüche und grössere Blattverschiebungen zeigen sich in der Landschaft generell als Dolinenreihen und besonders verwitterte Gebiete.

Auch Ablagerungen und Kolmatierungen (Löss, glazigene und siderolithische Sedimente) können die Verhältnisse im Epikarst beeinflussen und den Wasserabfluss in den Untergrund behindern.

4.5.2 Modellansatz

Die Schutzwirkung des Epikarsts wird anhand aller geomorphologischer, lithologischer und geologischer Kriterien bewertet und kartiert (Tabelle 5).

Oft ist der Epikarst von Boden überdeckt, und die verkarsteten Muster der Epikarstschicht sind ganz oder weitgehend unsichtbar.

Eine mit starker Verkarstung assoziierte Morphologie (Schacht, Doline, Mulde, Karrenfeld) legt zwar nahe, dass das Niederschlagswasser rasch in den gesättigten Bereich abfließt und die Schutzwirkung des Epikarsts daher gering ist, doch reicht das Fehlen einer verkarsteten Morphologie nicht aus, um eine grosse Schutzwirkung abzuleiten. Darum können dem Epikarst aufgrund von zusätzlichen Informationen (Lithologie, struktureller Kontext, Versickerungsversuche usw.) weitere Punkte zugeordnet werden.

Im Idealfall wird die Zuweisung des Epikarst-Schutzgrads durch Markierversuche verifiziert und validiert (Anhang A8).

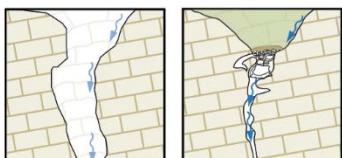
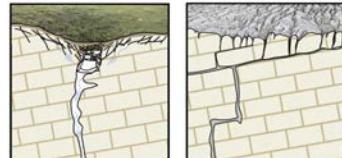
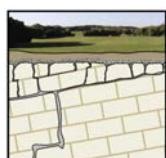
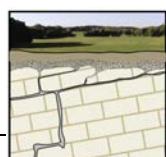
Die Gesamtqualität der Bewertung der Schutzfunktion hängt davon ab, wie engmaschig die bestehenden interpretierbaren Markierversuche zum fraglichen oder einem hydrogeologisch vergleichbaren Einzugsgebiet sind.

In manchen Fällen ist der Epikarst nicht sichtbar, weil er schlichtweg nicht existiert. Das heisst, der Fels weist keine verwitterte Oberfläche auf und das Wasser gelangt nur durch vereinzelte Risse in den Untergrund. Dies trifft beispielsweise auf erst kürzlich glazial abgeschliffenen Kalk zu. Ist er von Lockergestein überdeckt, muss das Wasser nicht nur vertikal durch die Deckschicht fliessen, sondern auch horizontal durch den Boden bis zu den Rissen, was die Verweilzeit des Wassers verlängert.

Die geomorphologische Kartierung erfolgt anhand der DHM, der Luftbilder und der geologischen Karten sowie spezifischer Felderhebungen.

Tabelle 5**Schutzhinweise für unterschiedliche Epikarstarten**

Die Minderungskorrektur bezieht sich auf den Parameter K. Falls die Daten aus Markiererversuchen stammen, ist die erhobene Minderung grösser, denn die Messung erfolgt generell an der Quelle oder Fassung und umfasst auch die Minderung des Bodens und des Karstsystems.

| Morphologie | Abbildung (Beispiel) | Beschreibung | Rückhalt | Minderung (Markiervers.) | Schutzhinweise |
|---|---|--|---------------|--|----------------|
| Schacht (Gouffre), Schluckstelle (Perte) |  | Punkt, der direkt mit dem Karstnetz verbunden ist | Null | 0 à 20 % Tracer-Rückgewinnung > 80 % | 0 |
| Doline, Karren (Lapiaz) |  | Verwitterte Oberfläche mit raschem Abfluss Richtung Karstnetz | Klein | 20 à 50 % Tracer-Rückgewinnung 50-80 % | 1 |
| Unsichtbar |  | Verwitterte Schicht mit Speichervermögen, aber starke Ableitung in das Karstnetz | Mittel | 50 à 80 % Tracer-Rückgewinnung 20-50 % | 3-6 |
| Unsichtbar |  | Kein Epikarst, keine verwitterte Schicht, geringe Ableitung in das Karstnetz | Gross | > 80% Tracer-Rückgewinnung < 20 % | 6-9 |

4.6 Parameter K (Karströhren)

4.6.1 Grundsatz

Der Abfluss des Wassers vom bodennahen Bereich (Boden und Epikarst) bis zum Austritt des Karstsystems (Karstquelle im natürlichen Zustand) erfolgt über ein Karströhrennetz, das natürlich entstanden ist und das Wasser optimal zum Austritt ableitet. Das Wasser fliesst im ungesättigten Bereich hauptsächlich senkrecht ab, im gesättigten Bereich waagrecht, mehrheitlich Richtung Austrittsstelle. Das Wasser kann vom ungesättigten direkt zum gesättigten Bereich gelangen (Abbildung 2, linke Seite) oder aber bis auf die wasserleitende Schicht hinabströmen und von da auf der undurchlässigen Deckschicht als unterirdischer Bachlauf bis zum gesättigten Bereich weiterfliessen. In beiden Fällen ist die Filtration innerhalb des Karstnetzes beschränkt, wohingegen räumlich konzentrierte Schadstoffbelastungen durch die Wassermengen aus dem gesamten Einzugsgebiet verdünnt werden.

4.6.2 Modellansatz

Insgesamt bewirkt der unterirdische Fliessweg des Wassers in jedem Fall eine geringfügige Filtration bzw. Verdünnung, womit dem **Karstnetz (K) standardmässig 1 Schutzbereich zugewiesen wird**. Nur in ausserordentlichen Fällen lässt sich ein Schutzwert von $K = 0$ begründen (z. B. Quelle, die von einer einzigen, nahegelegenen Schluckstelle gespeist wird).

Im ungesättigten Bereich wird bei diffuser, also wahrscheinlich temporärer Infiltration zusätzlich **1 Schutzbereich pro 300 m Mächtigkeit angerechnet** (vgl. Tabelle 6). Die Schutzwirkung wird deutlich verringert, wenn die Neubildung über eine perennierende Schluckstelle erfolgt. Darum wird für eine konzentrierte Schluckstelle **1 Punkt pro 1000 m Mächtigkeit angerechnet**.

Bei unterirdischen Bachläufen beträgt die Fliessgeschwindigkeit in der Regel um die 100 m/h bei Niedrigwasser und 300 m/h bei Hochwasser. Liegen keine spezifischen Daten vor (Markierversuch), wird für 5 km Luftlinie **1 Punkt angerechnet**.

In der gesättigten Zone beträgt die Fliessgeschwindigkeit bei Niedrigwasser in der Regel mässige 1 bis 50 m/h, kann bei Hochwasser aber ohne Weiteres 200 und bis zu über 500 m/h erreichen. Liegen keine spezifischen Daten vor (Markierversuch), wird für 2,5 km Luftlinie **1 Punkt angerechnet**.

Falls die Fliessgeschwindigkeit bekannt ist, wird pro 2 Verweiltage **1 Punkt angerechnet**. Dabei wird von Verhältnissen ausgegangen, die für ein Schadstoffunglück im Einzugsgebiet am sinnvollsten erscheinen. Angesichts der grossen Fächerung der Fliessgeschwindigkeiten (1 bis 1000 m/h) und ihrer grossen hydrologisch bedingten Variabilität verlässt sich die feldkundige hydrogeologische Fachperson auf ihren Sachverstand.

Falls ein Karstsystem direkt einen unverkarsteten Grundwasserleiter speist, ist von einer grösseren Filter- und Minderungswirkung auszugehen (Tabelle 4).

Abbildung 8**Abfluss des Wassers im ungesättigten und phreatischen Bereich.**

Falls die *undurchlässige Schicht* an der Basis des Kalkgestein höher liegt als die Karstquelle (rechts), bildet sich ein unterirdischer Bachlauf mit Freispiegelabfluss. Sonst gelangt das Wasser direkt in den gesättigten Bereich (links).

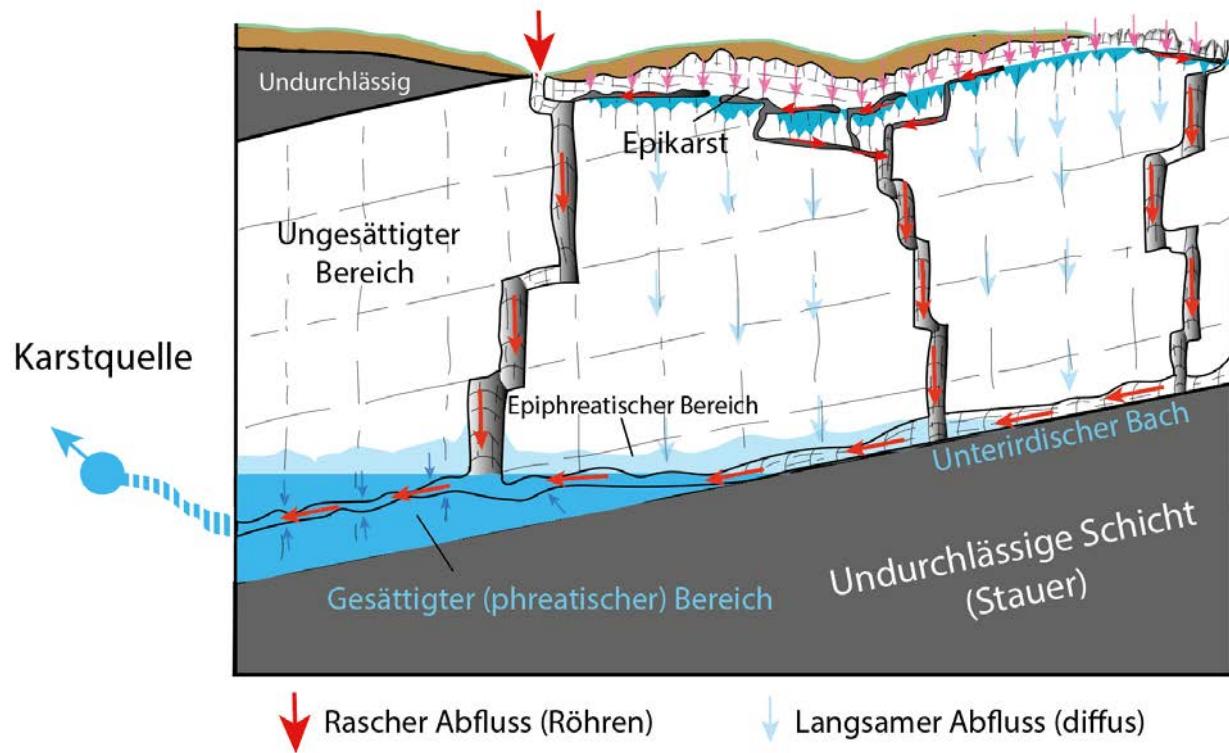
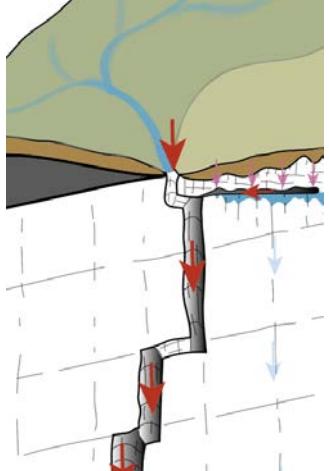
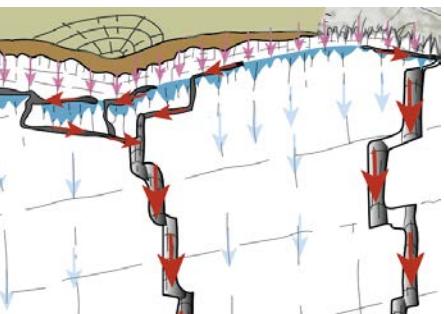
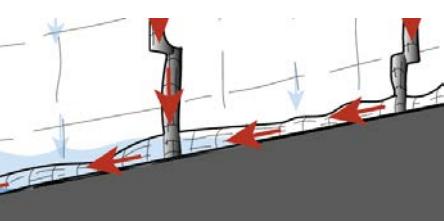
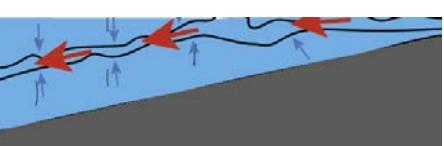


Tabelle 6**Standardmäßig wird dem Schutzfaktor Karstnetz (Parameter K) 1 Punkt zugewiesen.***Die Tabelle weist Richtwerte für zusätzliche Schutzwerte aus.*

| Zone | Illustration (Beispiel) | Beschreibung | Rückhalt | Schutzpte. |
|--|---|---|---|------------------|
| Ungesättigter Bereich unter Schluckstelle |  | Schacht, der durch eine perennierende Schluckstelle gespeist wird | Gering Sprühregen, starker Kontakt mit Schachtwand | 1 Pt. pro 1000 m |
| Ungesättigter Bereich (diffuse Infiltration) |  | Schacht, der von diffuser Infiltration gespeist wird (bei Niedrigwasser trocken) | Mittel Sprühregen, grosser Kontakt mit Schachtwand, Auffüllen leerer Becken | 1 Pt. pro 300 m |
| Unterirdischer Bachlauf |  | Freispiegelabfluss (selten < 50 m/h) | Sehr gering Schneller Abfluss, begrenzte Kontaktfläche | 1 Pt. pro 5000 m |
| Gesättigter Bereich |  | Unter Wasser liegende Röhren mit langsamem Abfluss bei Niedrigwasser (für Abflussmenge relativ grosser Querschnitt) | Gering Mässig schneller Abfluss, mittelgrosse Kontaktfläche | 1 Pt. pro 2500 m |

4.7 Parameterkombination und Vulnerabilitätskarten

Die Vulnerabilitäts- oder Schutzkarte ergibt sich aus der Summe der Schutzwerte für die verschiedenen Parameter.

Diese werden in folgenden Schritten miteinander kombiniert (Abbildung 9):

- 1) Identifikation der Schluckstellen und halbkonzentrierten Infiltrationsgebiete, Bestimmung ihrer Einzugsgebiete;
- 2) Kartierung von Parameter I in den unter 1) bestimmten Einzugsgebieten;
- 3) für alle diffusen und halbdiffusen Infiltrationszonen Kartierung der Parameter E und P:
 - a) für die diffusen Infiltrationszonen Addieren der Werte E und P;
 - b) für die halbdiffusen Infiltrationszonen Summe der Parameter E und P, geteilt durch 2;
- 4) Kartierung von Parameter K;
- 5) für jede Zone des Einzugsgebiets Addieren der Werte I oder E + P mit K. Die so erlangte Karte der Schutzfaktoren (Vulnerabilitätskarte) berücksichtigt den Fließweg von der Infiltration bis zur Fassung.

Bei konzentrierter Infiltration ist I generell gleich null oder sehr klein, wobei E und P unberücksichtigt bleiben. In allen anderen Fällen dient der Parameter I lediglich dazu, die Summe von E und P zu verändern. Im Folgenden einige Anschauungsbeispiele:

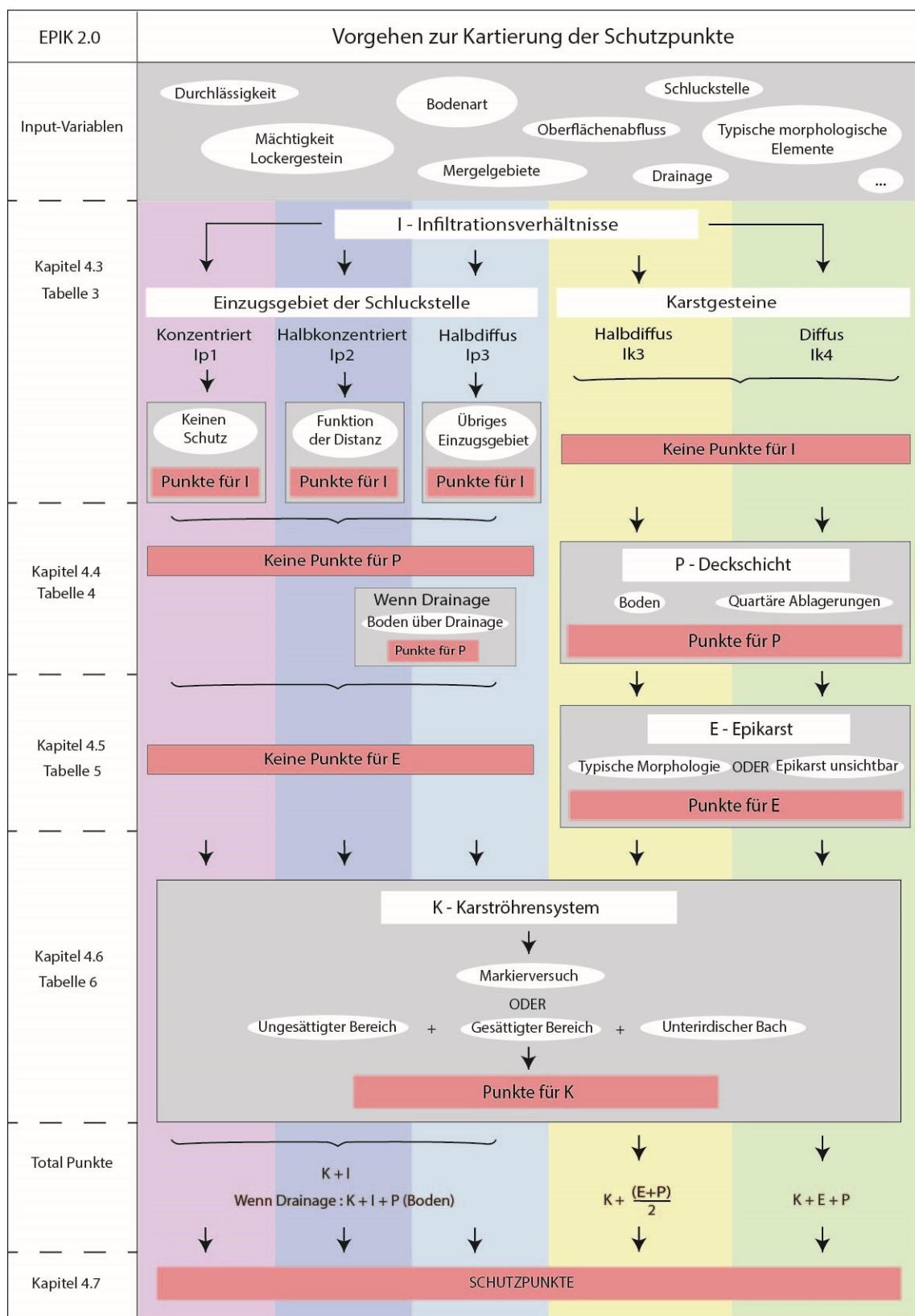
- Für eine Schluckstelle erhält man I = 0 und K = 1.
- Für ein kaum überdecktes Karrenfeld erhält man insgesamt ungefähr 3 Punkte: K = 1, E = 1 und P = 1.
- Bei stark überdeckten Zonen eines grossen Karstgebiets (mit Verdünnung) können 20 Punkte und mehr erreicht werden; z. B. K = 5, E = 6 und P = 10.

Generell liegt die Summe der Schutzwerte zwischen 2 und 20. Wie gezeigt, sind aber auch Fälle mit über 20 Punkten möglich.

Bei dieser Methode kommt der feld- und sachkundigen hydrogeologischen Fachperson für alle Parameter ein gewisser Interpretationsspielraum zu, am meisten aber wohl für den Parameter E. Bei der Anwendung der Methode ist es zentral, das Minderungsvermögen der einzelnen Teilsysteme, durch die das Wasser und eine allfällige Schadstoffbelastung effektiv fliesst, richtig zu bewerten.

Abbildung 9

Schema für die Zuweisung der Schutzbpunkte bei der Kartierung der Parameter E, P, I und K. In der Praxis ist es naheliegend, zuerst den Parameter I, dann P und E, zuletzt K zu bewerten.



4.8 Überführung in Grundwasserschutzzonen und -bereiche

Gemäss Gewässerschutzverordnung und ihrem Anhang 4 umfasst die Zone S1 einen Bereich von 10 m rund um die Fassung sowie allfällige Schluckstellen und ihre unmittelbare Umgebung, für die eine Gefährdung der Trinkwasserversorgung besteht. Die Zone S2 wird grundsätzlich als Bereich von 100 m in Zuströmrichtung zur Zone S1 ausgeschieden, die direkt mit der Fassung (nicht mit den Schluckstellen) zusammenhängt.

Für Bereiche ausserhalb der Zone S2 gibt Tabelle 7 vor, wie die Schutzwerte aus der Vulnerabilitätskarte in Grundwasserschutzzonen (Sh und Sm) bzw. Grundwasserschutzbereiche (Au und Ao) umzuwandeln sind.

Tabelle 7

Umwandlung der Schutzwerte in Gewässerschutzzonen und -bereiche für eine Fassung.

| Schutzpte. | Schutz | Vulnerabilität | Zone S/Bereich Au / Ao |
|------------|--------------------|----------------|------------------------|
| 0 à 1 | Sehr schwach | Hoch | Sh |
| 2 à 5 | Schwach | | |
| 6 à 9 | Schwach bis mässig | | |
| 10 à 12 | Mässig | Mittel | Sm |
| 12 à 15 | Mässig bis stark | | |
| > 15 | Stark | Gering | Au / Ao |

5 Schlussfolgerung

Die vorliegende Praxishilfe beschreibt die allgemeinen Grundsätze für die Bewertung der Vulnerabilität, also des Schutzes in stark heterogenen, verkarsteten oder ähnlichen Gebieten. Die gewählte Methode beruht darauf, für die einzelnen Punkte eines Fassungseinzugsgebiets die Karst-Teilsysteme, durch die ein allfälliger Schadstoff fließt, und dessen Verweilzeit zu beurteilen. Die Verweilzeit wird anhand von unterschiedlichen Daten, die nach einer Reihe von Kriterien miteinander verknüpft werden, mit Schutzzpunkten bewertet.

Damit die Anwendung möglichst transparent und reproduzierbar ist, werden die Stammdaten für das gesamte Gebiet in einem GIS aufbereitet und kombiniert. Doch ist der Datenbestand nie perfekt, weshalb er von einer hydrogeologischen Fachperson, die das Karstsystem und die untersuchte Region gut kennt, validiert und oftmals auch korrigiert werden muss, sodass zuverlässige und glaubwürdige Aussagen resultieren. Zu Transparenzzwecken ist es empfehlenswert, GIS-Layer zu erstellen, die diese Korrekturen abbilden und dokumentieren. Angesichts der regelmässigen Nachführung und Präzisierung der Daten ist es wichtig, dass nachvollziehbar bleibt, was weshalb korrigiert wurde.

Dieses Vorgehen lässt der hydrogeologischen Fachperson und den zuständigen Kantonsstellen also einen gewissen Handlungsspielraum, um die Ausscheidung der Schutzzonen in voller Transparenz für Verhältnisse vorzunehmen, die am realitäts- und praxisnächsten erscheinen.

Die Beurteilung der Schutzzonen gemäss der hier beschriebenen Methode erfolgt grundsätzlich unabhängig von der Verunreinigungs-Risikokarte, die als Ergänzung des Schutzzonenendossiers für stark heterogene Gebiete dient.

6 Literaturverzeichnis

- Brouyères, 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 physically based approach, in: Proceedings of the 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besançon, Sept. 2001. S. 67–72.
- Filipponi, M., Schmassmann, S., Jeannin, P.Y., Parriaux, A., 2012. KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau. Bundesamt für Strassen ASTRA / Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich, Schweiz.
- Hamedinger, T., 2019. Kartierung der Rückhaltezeit von Schadstoffen im bedeckten Karst (MSc thesis). Universität für Bodenkultur Wien, Department für Bautechnik und Naturgefahren.
- Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. & Dreybrodt W. (editors), 2000: Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, NSS publisher: 527 p.
- OFEV, 2022. Protection des eaux souterraines : aquifères karstiques et fissurés fortement hétérogènes. Un module de l'aide à l'exécution Protection des eaux souterraines (n° 2223), L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Doerfliger, N., Zwahlen, F., 1998. Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK). Praxishilfe. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Jeannin, P.Y., Cornaton, F., Zwahlen, F., Perrochet, P., 2001. Vulk: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation, in: Proceedings of the 7th Conference on Limestone Hydrogeology and Fissured Media, 20-22 sept. 2001. pp. 185–190.
- Pochon, A., Zwahlen, F., 2003. Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen bei Kluft-Grundwasserleitern (Praxishilfe). BUWAL / BWG, Bern.
- Sinreich, M., Pochon, A., 2015. Standardized Approach for Conducting Tracing Tests in Order to Validate and Refine Vulnerability Mapping Criteria, in: Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P., LaMoreaux, J.W. (Eds.), Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 131–137. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17435-3_15
- Ford, D., Williams, P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. Wiley.
- Johnson, S.B., Stieglitz, R.D., 1990. Karst features of a glaciated dolomite peninsula, Door County, Wisconsin. Geomorphology 4, 37–54.
- Gilli E. 1995. La spéléologie. Que sais-je ?, Presses universitaires de France.
- Rodet J. 1992. La craie et ses karsts. Centre de géomorphologie du CNRS, 1ière édition. 1992.
- Masson H. 1972. Sur l'origine de la cornieule par fracturation hydraulique. Eclogae geol. Helv., vol. 65/1 : 27-41.
- Debelmas J., Gidon M., Kerckhove C., 1976. Idées actuelles sur les cagneules alpines. Doc. lab. Geol. Fac. Sci. Lyon, HS4, 195-201.
- Furrer, H. (Ed.) 1985: Field workshop on Triassic and Jurassic sediments in the Eastern Alps of Switzerland. Mitt. Geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich (N.F.) 248, 1-81.
- Frank, M. 1986. Die Raibl-Gruppe und ihr Liegendas im Oberostalpin Graubündens. Mitteilungen aus dem Geologischen Institut der Eidg. technischen Hochschule und Universität Zürich N.F. 269, 1–239.
- Frumkin A. 2000. Dissolution of Salt. In: Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. & Dreybrodt W. (editors): Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, NSS publisher: 169-170.

Rechtsgrundlagen

GSchG (1991): Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer. Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft.

GSchV (1998): Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998. Der Schweizerische Bundesrat.

BUWAL (2004): Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 141 S.

BAFU, 2022. Grundwasserschutz in stark heterogenen Karst- und Kluft-Grundwasserleitern. Ein Modul der Vollzugshilfe Grundwasserschutz (Nr. 2223), Umwelt-Vollzug. Bundesamt für Umwelt, Bern.

7 Anhänge

A1 Charakteristiken der Verkarstung der wichtigsten verkarstungsfähigen geologischen Formationen in der Schweiz. Anwendbarkeit der Methode EPIK 2.0

Die nachstehende Tabelle wurde angepasst von Filippioni et al. (2012) übernommen. Grundsätzlich sind alle anderen Formationen als nicht verkarstungsfähig anzusehen.

Legende:

0 = sehr schwach 1 = schwach; 2 = mittel 3 = hoch

| Lithologie (Formation) | Verkarstungsfähigkeit | Löslichkeit | Verkarstungscharakteristika | Hinweis zur Anwendung von EPIK 2.0 | Anwendbarkeit von EPIK 2.0 | Literatur |
|---------------------------|-----------------------|-------------|---|---|-------------------------------|--|
| Kalk | 3 | 2 | Klassische Formen, weiträumig entwickelte Karstsysteme, häufig mehrphasig. | Hauptanwendungsbereich der Methode EPIK 2.0 | 3 | Filippioni et al. (2012), Ford & Williams (2007) |
| Dolomit | 2 | 2 | Langsamere und kleinräumigere Verkarstung als im Kalk; bei geringmächtigen Vorkommen Verkarstung abhängig von der Verkarstungsfähigkeit des Umgebungsgesteins. | In homogenen, mächtigen Dolomitabfolgen ist die Methode grundsätzlich anwendbar. Trifft auch zu für Bänke in wenig verkarstungsfähigem Gestein. | 2 | Johnson (1990) |
| Mergel | 1 | 1 | Verkarstung meist in kalkhaltigeren, nicht aber in tonigen Bänken. Darum in mächtigen Mergel-Formationen selten durchgehend. | Die Verkarstungsfähigkeit von Mergel wird häufig unterschätzt. In einigen Fällen EPIK 2.0 empfohlen, ansonsten eher DISCO. | 1 | Gilli (1995) |
| Kalkschiefer | 2 | 1 | Verkarstungsfähigkeit sehr variabel, stark abhängig vom Kalkgehalt. Bei hohem Kalkgehalt kalkähnliche Verkarstung, auch wenn die Oberflächenformen wegen der mechanischen Schwäche im Fels wenig ausgeprägt sind. | Anwendbarkeit von EPIK 2.0 stark von Kalkgehalt abhängig. In einigen Fällen EPIK 2.0 empfohlen, ansonsten eher DISCO. | 1 | |

| | | | | | | |
|---|---|---|--|--|---|--|
| Marmor | 3 | 2 | Als Kalkgestein verkarstet Marmor klassisch. Bei geringmächtigen Marmorbändern in kaum löslichen Formationen (z. B. Gneis) Verkarstung quasi als 2D-System dem Marmorbank entlang. | EPIK 2.0 sollte angewendet werden. | 3 | |
| Kalkbrekzien und -konglomerate (inkl. Jura-Nagelfluh) | 1 | 2 | Verkarstung möglich, wegen geringer Felsstabilität aber beschränkt. Doch sind recht stabile Höhlen möglich (z. B. in Jura-Nagelfluh/Gompholithen). | In einigen Fällen EPIK 2.0 empfohlen, ansonsten eher DISCO. | 2 | |
| Kreide | 2 | 2 | Aufgrund hoher Porosität und Homogenität der Gesteinsmasse sind Hohlräume eher selten. In der Schweiz sind Vorkommen selten, oft innerhalb verkarsteter Kalkformationen. | Die Seekreidevorkommen in der Schweiz (z. B. Le Locle) sind nur partiell verkarstet. EPIK 2.0 grundsätzlich nicht anwendbar. | 1 | Rodet (1992) |
| Sandstein (mit Kalkmatrix) | 2 | 1 | Je nach Kalkgehalt kalkähnliche Verkarstung, besonders bei kompakten Formationen. Ihre Verkarstungsfähigkeit wird häufig unterschätzt. | In einigen Fällen EPIK 2.0 empfohlen, ansonsten eher DISCO. | 2 | |
| Rauhwacke (Cornieule) | 2 | 2 | Gips kann in heterogenen Rauhwacke-Vorkommen lokal, bisweilen regional zu Verkarstung und Instabilitäten führen. | In einigen Fällen EPIK 2.0 empfohlen, ansonsten eher DISCO. | 2 | Masson (1972) ; Debelmas et al. (1976); Furrer et al. (1985); Frank (1986) |
| Gips und Anhydrit | 3 | 3 | Anhydrit ist generell kaum, Gips hingegen stark verkarstet. Schnelle, eher oberflächennahe (einige Dutzend Meter) Entwicklung der Verkarstung. | Wegen grossem Sulfatgehalt sind Gipsformationen nicht für die Trinkwassergewinnung geeignet. | 0 | Klimchouk (2000) |
| Salz | 3 | 3 | Wegen der schnellen Lösung des Gesteins gibt es kaum Aufschlüsse. Die Verkarstung entwickelt sich sehr schnell, sobald ungesättigtes Wasser über die Salzformation fliesst. | Wegen dem grossen Natriumchlorid-Gehalt sind Salzformationen nicht für die Trinkwassergewinnung geeignet. | 0 | Frumkin (2000) |

A2 Abgrenzung des Quell- oder Fassungseinzugsgebiets im Karstgebiet

Um die Ausdehnung des Kartierungsgebiets so zu bestimmen, dass das gesamte genutzte Grundwasservorkommen geschützt wird, ist die Abgrenzung des Fassungseinzugsgebiets unerlässlich.

Mit einem konzeptuellen Modell des Grundwasserstroms lassen sich die Abflussverhältnisse nachvollziehen und erklären. Dieses Modell fasst den Datenbestand zusammen, beschreibt die verschiedenen Abstrombereiche und weist das Einzugsgebiet aus. Es muss für jeden Gebietspunkt ausdrücklich darlegen, welchen Weg das Wasser nach Meinung der feldkundigen hydrogeologischen Fachperson vom Infiltrationsgebiet bis zu der oder den Fassung(en) zurücklegt.

A2-1 Vorgehen

Das konzeptuelle Modell wird in sechs Schritten erstellt

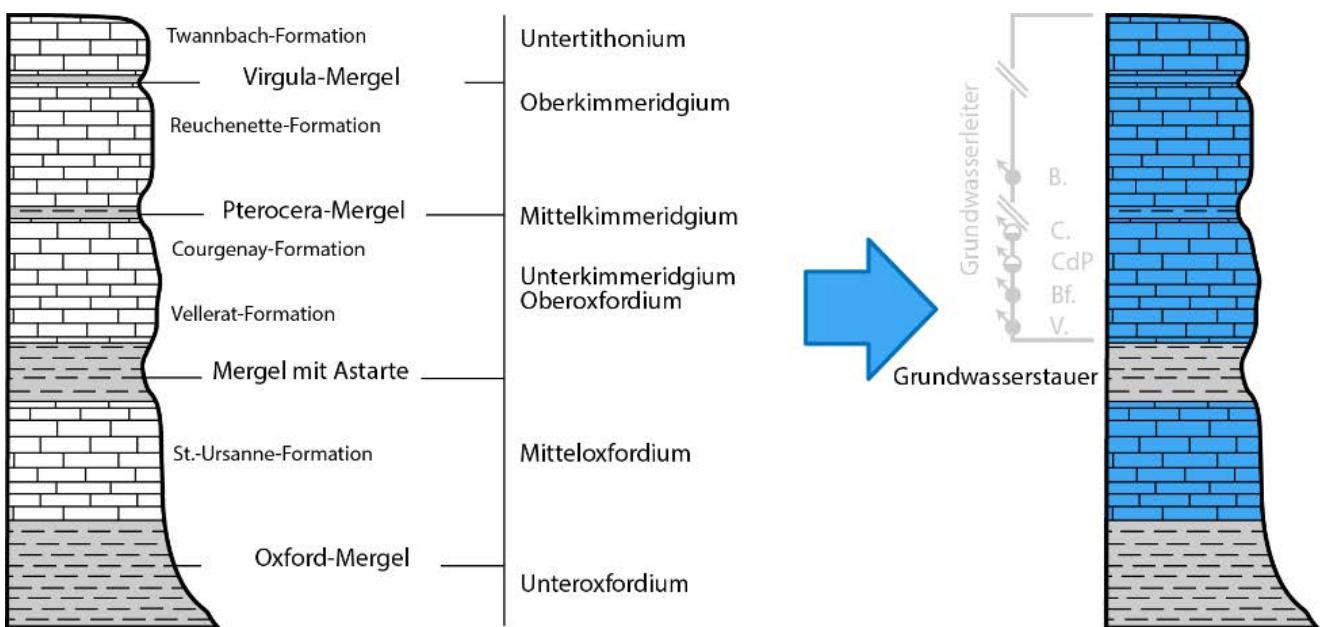
1) Von der lithologischen Beschreibung zu hydrostratigrafischen Größen

Anhand der vorliegenden lithologischen Profile (Erläuterungen zum Geologischen Atlas, Dissertationen, Fachartikel, Regionalstudien) werden die möglicherweise verkarsteten oder zumindest durchlässigen geologischen Schichten ermittelt, die als Grundwasserleiter zu erachten sind. Auch die undurchlässigen Schichten sind bedeutungsvoll, weil sie die Grundwasservorkommen begrenzen. Oft ist eine Verifizierung der literurbasierten Hypothesen mittels Felderhebungen empfehlenswert, da sich die regionalen Erscheinungsbilder erheblich unterscheiden können.

Abbildung 10

Beispiel der Umwandlung einer lithostratigrafischen Beschreibung in ein hydrostratigrafisches Profil

(Grundwasserleiter blau, Grundwasserstauer grau).



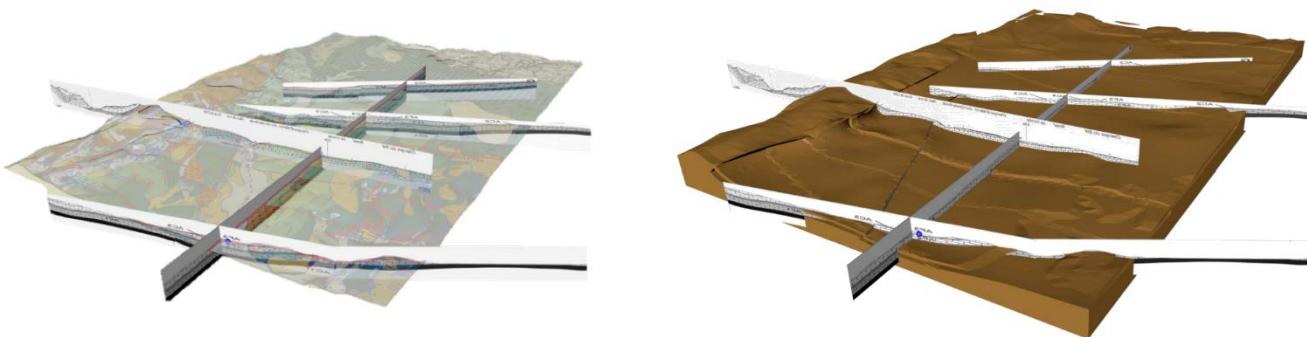
2) Geologisches Modell erstellen und Geometrie der wasserleitenden Schichten bestimmen

Das Wasser fliesst in drei Dimensionen von den Infiltrationsbereichen durch den Grundwasserleiter zu den Austrittsbereichen. Darum muss die Geometrie der wasserleitenden Schichten möglichst gut abgebildet werden. Die am häufigsten verwendbaren Daten stammen aus der geologischen Karte und den geologischen Profilen. Für eine vertiefte Untersuchung wird der Geologische Atlas beigezogen und mit Daten aus lokalen geologischen Studien und geophysikalischen Studien sowie Sondierungsdaten ergänzt. Bei einfachem geologischem Aufbau kann die Zusammenstellung manuell oder vorzugsweise in einem GIS erfolgen. Dabei wird eine grobe Isohypsen-Karte der Grundwasserleiterbasis erstellt. Bei komplexerem Aufbau empfiehlt sich ein computergestütztes 3D-Modell, um die Strukturen richtig zu verstehen.

Abbildung 11

Links: geologische Karte und Profile in einer 3D-Umgebung.

Rechts: Geometrie der undurchlässigen Schicht (Grundwasserleiterbasis), die aus dem geologischen Datenbestand interpoliert wurde.



3) Abgrenzung der gesättigten Bereiche

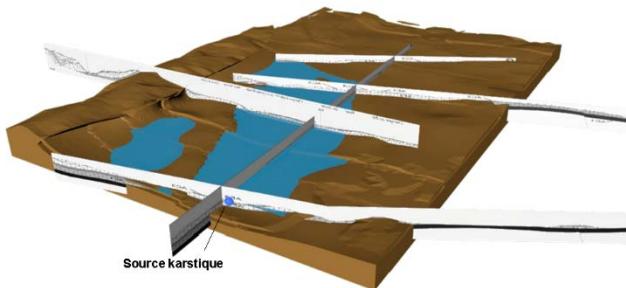
Unterhalb der Austritte ist der Grundwasserleiter zweifellos gesättigt. Daher gelten die wasserleitenden Gesteinsschichten, die tiefer liegen als die Quellen (oder Fassungen), als gesättigter Bereich. Dieser kann auf der Isohypsen-Karte standardmäßig mit Gradienten nahe bei null dargestellt werden (horizontaler Wasserspiegel). Liegen aber Daten zur Spiegelhöhe vor, kann dem Grundwasserspiegel durchaus ein gewisses Gefälle beigemessen werden.

Es empfiehlt sich, die Grundwasservorkommen auf die geologischen Profile zu übertragen, um eine klarere Vorstellung der Abflussverhältnisse zu erhalten.

Bei komplexen Geometrien wird ein 3D-Modell verwendet, um die Ausdehnung des Vorkommens sowie die Bereiche mit freiem und mit gespanntem Grundwasser direkt zu visualisieren. Zudem lassen sich so mögliche bruchbedingte Verbindungen zwischen den unterschiedlichen wasserführenden Bereichen und Schichten bestimmen.

Abbildung 12

Ausdehnung eines Grundwasservorkommens, die anhand eines geologischen 3D-Modells von der Karstquelle ausgehend extrapoliert wurde

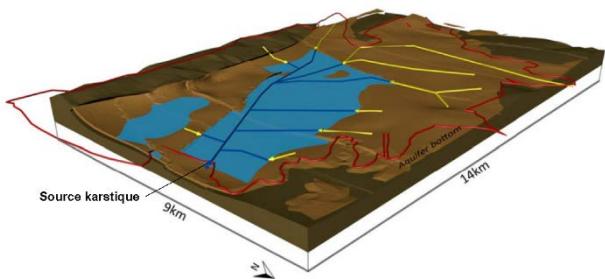


4) Skizze des Abflusssystems und des Einzugsgebiets

Im Allgemeinen fliesst das Wasser vom Neubildungsgebiet senkrecht in den ungesättigten und weiter bis in den gesättigten Bereich oder aber zur undurchlässigen Basis des Grundwasserleiters und von da den Gesteinsschichten entlang abwärts bis in den gesättigten Bereich. Je nach Grösse und Art des Neubildungsgebiets und dem Vorhandensein von Schluckstellen können die wichtigsten Entwässerungswege im ungesättigten Bereich eingetragen und die Punkte bestimmt werden, an denen der Wasserstrom das Grundwasser erreicht. Von diesen Punkten fliesst das Wasser über den Weg des geringsten hydraulischen Widerstands weiter Richtung Quelle, d. h., es folgt entweder dem kürzesten Weg oder den besonders durchlässigen Strukturen (z. B. Brüche). So lässt sich der Weg des Wassers skizzieren und bestimmen, woher das Wasser einer Quelle oder Fassung stammt.

Hinweis: Oft ist es schwierig, die Neubildungsgebiete von Quellen und Fassungen zu ermitteln, wenn ein gesättigter Bereich mehrere Austritte aufweist. Die Grenzen müssen nach hydraulischen Gesichtspunkten unter Berücksichtigung der Höhe und der Abflussmenge der Austritte festgelegt werden.

Die Schritte 1) bis 4) können grob mit der geologischen Karte und den Profilen oder präziser mit der Erstellung einer Isohypsen-Karte vollzogen werden. Mit der Freeware Visual KARSYS kann dies Schritt für Schritt in 3D gemacht werden.

Figure 13**Hauptentwässerungswege (gelb = ungesättigt, blau = gesättigt) und Einzugsgebiet der Karstquelle**

5) Überprüfung anhand der Wasserbilanz

Generell ist der Wasserabfluss an den Austritten proportional zur Oberfläche, die den Karst-Grundwasserleiter speist. Darum ist es wichtig, alle Austritte aus einem Grundwassersystem zu identifizieren und ihre Abflussmenge zu bestimmen. Dabei kann in Größenordnungen vorgegangen werden (10, 100, 1000, 10 000 l/s).

In der Schweiz hängt die durchschnittliche Abflussmenge einer Quelle von der Fläche des Einzugsgebiets sowie der Häufigkeit und Intensität der Niederschläge ab, die ihrerseits stark durch die Höhe über Meer bedingt sind.

Die *spezifische* Abflussmenge einer Quelle (durchschnittlicher Abfluss pro km^2 Einzugsgebiet) ist also im Allgemeinen durch die Höhenlage des Einzugsgebiets gegeben. Tabelle 8 weist die durchschnittlichen spezifischen Abflussmengen nach Höhe über Meer aus (Größenordnung).

Tabelle 8**Durchschnittliche spezifische Abflussmengen für verschiedene Höhenlagen in der Schweiz (Größenordnung).**

| Höhe [m ü. M.] | 500-800 | 800-1100 | 1100-1400 | 1400-1700 | 1700-2000 | >2000 |
|--|---|---|---|---|--|--|
| Durchschnittlicher spezifischer Abfluss | 15-30 [$\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$] | 20-40 [$\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$] | 30-60 [$\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$] | 40-80 [$\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$] | 50-100 [$\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$] | 70-140 [$\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$] |

Die Wasserbilanz berücksichtigt auch Karstflächen, die möglicherweise andere Austritte speisen, und umgekehrt nicht verkarstete Flächen, die den Karst speisen (z. B. tertiäre Synklinale mit Bachläufen, die im Karst verschwinden). Diesbezüglich liefern die Karstkarten einiger Kantone wertvolle Hinweise.

Bei der Ausscheidung der Einzugsgebietsflächen werden die Abflussmengen an mehreren Austritten gemessen und es wird eine vollständige Wasserbilanz erstellt.

Wenn ein Grundwasservorkommen über mehrere Austritte verfügt, kann es schwierig sein, für jede Quelle und Fassung das zugehörige Einzugsgebiet zu ermitteln. Hier müssen die hydrologischen Grundsätze angewendet

und die Höhe sowie die Abflussmengen der Austritte berücksichtigt werden. Auch Abflussmodelle können hilfreich sein, wobei ein qualitativer Ansatz meist ausreicht.

6) Verifizierung des Einzugsgebiets mit Markierversuchen

Das erstellte Modell kann mit Markierversuchen im angenommenen Bereich des Einzugsgebiets verifiziert werden. Dazu werden zuerst die Daten vergangener Versuche zusammengestellt und auf ihre Zuverlässigkeit geprüft, denn nicht alle wurden systematisch genug durchgeführt.

Mit diesen sechs Schritten sollte ein Modell möglich sein, das zwischen den Neubildungsgebieten eines Karstmassivs und seinen Austritten eine schlüssige Verbindung herstellt. So lässt sich die Grundwasserfassung in ihr hydrogeologisches Umfeld einbetten und ein Einzugsgebiet eruieren, das sich den effektiven Verhältnissen nähert.

Wichtige Referenzen

Jeannin P.-Y.; Eichenberger U.; Sinreich M.; Vouillamoz J.; Malard A.; Weber E. (2013). KARSYS, a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Application to the assessment of reserve and resource estimation of groundwater in Switzerland. — *J. of Environmental Earth Sciences*. 69(3): 999–1013. DOI 10.1007/s12665-012-1983-6.

Malard A., Jeannin P.-Y., Vouillamoz J., Weber E. (2015). An integrated approach for catchment delineation and conduit-network modeling in karst aquifers: application to a site in the Swiss tabular Jura. — *Hydrogeology Journal*. 23(7): 1341–57.

Malard A., Sinreich M., Jeannin P.-Y. (2016). A novel approach for estimating karst groundwater recharge in mountainous regions and its application in Switzerland. — *Hydrological Processes*. 30(13): 2153–66.

Malard A. (2018). Hydrogeological characterization of karst aquifers in Switzerland using a pragmatic approach. — PhD-Thesis, University of Neuchâtel, 2018.

A3 Charakterisierung der quantitativen und qualitativen Wasserparameter (Monitoring)

A3-1 Monitoring-Parameter

Die folgenden Parameter werden am häufigsten beobachtet:

- **Abflussmenge:** für die Fassung, aber auch für alle Austrittsbereiche des Einzugsgebiets (perennierende und Überlaufquellen). Punktuelle Messungen oder sogar das Erstellen einer Wasserstand-Abfluss-Beziehung können nötig sein.
- **Elektrische Leitfähigkeit:** Die Variabilität dieses Parameters bei Hochwasser kann Aufschluss über die rasche Infiltration von wenig mineralisiertem Wasser geben (Schluckstelle oder Sickerwasser). Achtung: Die elektrische Leitfähigkeit hängt von der Infiltrationshöhenlage ab (Flachland: 600–700 µS/cm; 1000–1500 m ü. M.: 300–400 µS/cm; über 2000 m ü. M.: 100–150 µS/cm). Der CO₂-Partialdruck im Boden des Einzugsgebiets bestimmt, wie viel Kalk das Wasser im Untergrund lösen kann.
- **Temperatur:** Grosse Temperaturschwankungen können ein Hinweis darauf sein, dass der Oberflächenwasseranteil gross ist (Schluckstellen).
- **Trübung:** Die Trübung ergibt sich entweder aus der Reaktivierung von Feinstoffen, die sich im gesättigten oder im Übergangsbereich abgelagert hatten (autochthone Trübung), oder aus dem Eintrag von getrübtem Oberflächenwasser (allochthone Trübung aus Schluckstellen). Bei allochthoner Trübung fällt das Auftreten von Bakterien oft mit den Abflussspitzen zusammen.

Wenn möglich:

- **UV-Fluoreszenz:** Mit der Messung der UV-Fluoreszenz lassen sich kontinuierlich die Schwankungen der organischen Substanzen (TOC) nachweisen. Wie die allochthone Trübung und das Auftreten von Bakterien ist dieser Parameter ein Hinweis auf die rasche Infiltration an Schluckstellen.

Es ist ratsam, die hier genannten Parameter zumindest während eines hydrologischen Zyklus «kontinuierlich» (z. B. alle 30 Min.) zu messen. Mindestens sollten sowohl Niedrigwasser- als auch Hochwasserdaten erhoben werden.

Mit der Messung dieser Parameter kann das Verhalten und die Vulnerabilität des Karstsystems als Ganzes beurteilt werden.

Es ist in jedem Fall unerlässlich, alle Austritte des Systems (perennierende und Überlaufquellen) bei Hochwasser zu untersuchen, d. h. sie zu identifizieren, ihre Abflussmenge zu schätzen sowie ihre Temperatur und elektrische Leitfähigkeit zu messen. Auf dieser Grundlage ist die kontinuierliche Messung des Wasserstands, der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur an den charakteristischsten Austritten erforderlich, um die Variabilität des Systemverhaltens zu beurteilen. Eine grosse Variabilität ist ein mögliches Verkarstungs-anzeichen, doch gibt es auch verkarstete Systeme bei denen sie mässig bis gering ist.

A3-2 Probenkampagnen

Falls das kontinuierliche Monitoring nicht oder nur sehr beschränkt möglich ist, sollten an den Austritten so viele Proben zur Beurteilung der Wasserqualität manuell entnommen werden, dass die ganze Spannbreite der hydrologischen Verhältnisse abgebildet wird. Dies erfordert 10 bis 20 Feldbegehungen und Probenahmen. Falls möglich, werden dabei auch der gelöste Sauerstoff (besonders wichtig für Bohrungen und tiefe Grundwasserleiter wie Dogger) und der pH-Wert erhoben.

Jedenfalls ist eine gewisse Anzahl Probenahmekampagnen notwendig, um die standardmässigen Wasserqualitätsanalysen auszuführen, die für Trinkwasserfassungen vorgeschrieben sind: Hauptionen, Gesamtkeimzahl, E. coli, Enterokokken, Pflanzenschutzmittel, Kohlenwasserstoffe.

Weitere Analysen werden gezielt vorgenommen.

A3-3 Interpretationsbeispiel von Daten aus drei BAFU-Messstellen für das Karst-Monitoring

Abflussmenge

Die Messstellen Boncourt-Milandre amont (MIL) und Brot-Dessous-Bossy (BOS) weisen ein pluviales Grundwasserregime auf, das seinen Höchststand im Winter und seinen Tiefststand im Sommer erreicht. Dagegen ist das Regime der Messstelle Muotathal-Schlüchteden Brünnen (SB) im Wesentlichen nival mit einem Tiefststand im Winter und einem Höchststand während der Schneeschmelze zwischen April und August. Das Einzugsgebiet der Quellen MIL und BOS liegt somit unterhalb von 1000 m ü. M., während dasjenige von SB zumindest teilweise auf über 2000 m ü. M. hinaufreicht.

Die Hochwasserspitzen von MIL und SB (schneefreie Zeit) sind schmal und hoch. Die Quelle ist also gut mit dem Karstnetz verbunden, welches das Massiv entwässert. Dagegen sind die Spitzen von BOS weniger ausgeprägt und fallen breiter aus. Diese Fassung ist nur lose mit dem Karstnetz verbunden, was davon zeugt, dass die Bossy-Quelle der Austritt eines künstlichen Stollens ist, der nicht nur das Kalkgestein, sondern auch den Grundwasserleiter eines Moränenwalls durchquert.

Temperatur

Die Wassertemperatur bei MIL bleibt im Jahreswechsel relativ konstant (10,2–10,8 °C) und entspricht der durchschnittlichen Jahrestemperatur für die Höhenlage der Messstation. Das Thermogramm weist beim Hochwasser am Jahresanfang Kältespitzen, im Sommer und zu Winterbeginn Wärmespitzen auf. Die geringen Variationen zeugen von einer hauptsächlich diffusen Neubildung (keine grösseren Schluckstellen), während die Alternierung zwischen Wärme- und Kältespitzen auf einen ungesättigten Bereich von 50 bis 100 m Mächtigkeit schliessen lässt.

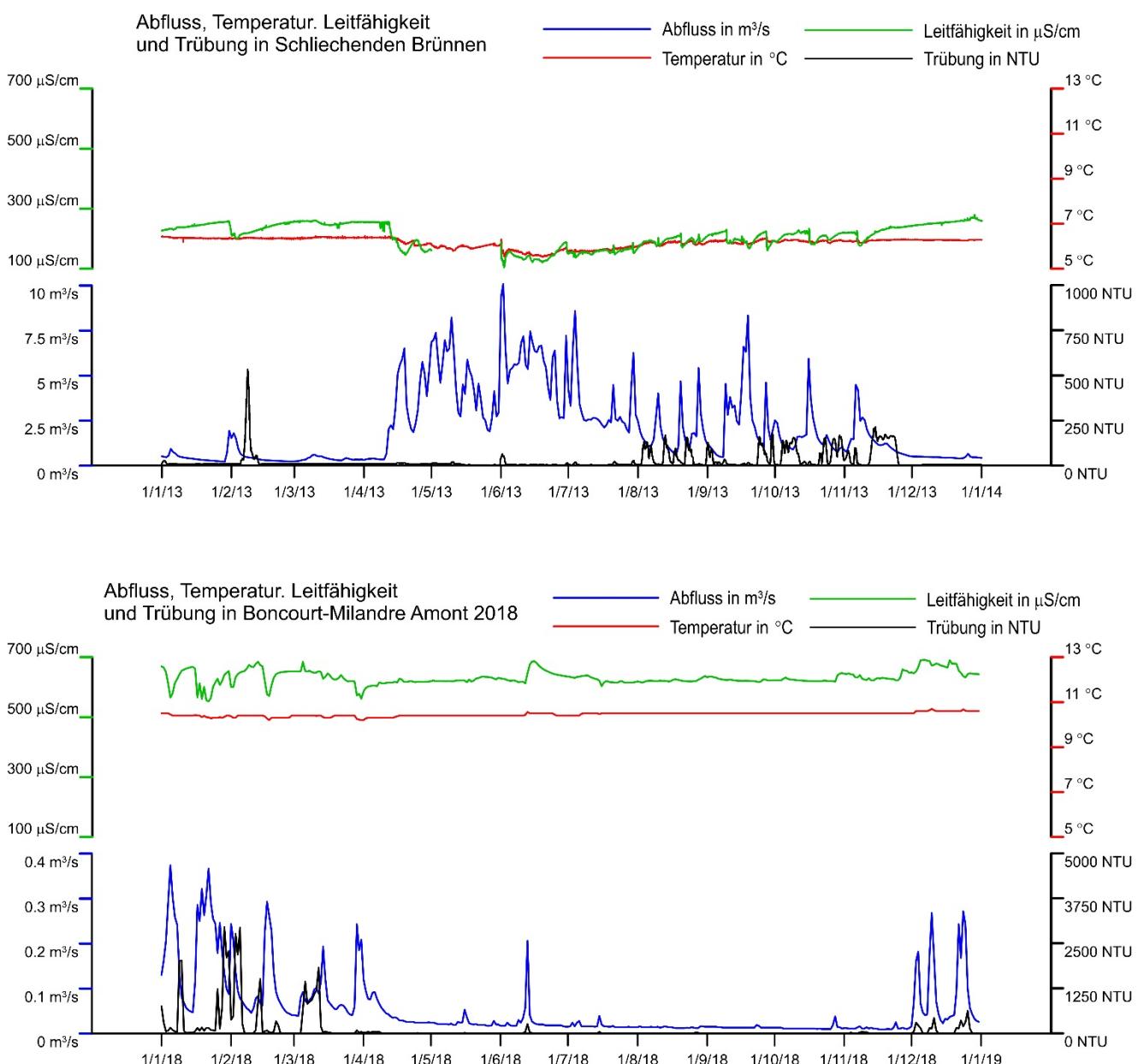
Das Thermogramm von BOS sieht recht ähnlich aus wie dasjenige von MIL, doch liegt die Wassertemperatur (~11,3 °C) über der durchschnittlichen Aussentemperatur am Standort (~9 °C). Eine thermale Komponente im Quellwasser ist daher wahrscheinlich. Die sehr kleinen Kältespitzen könnten den schwankenden Anteilen der warmen und kalten Komponenten am Wassergemisch entsprechen.

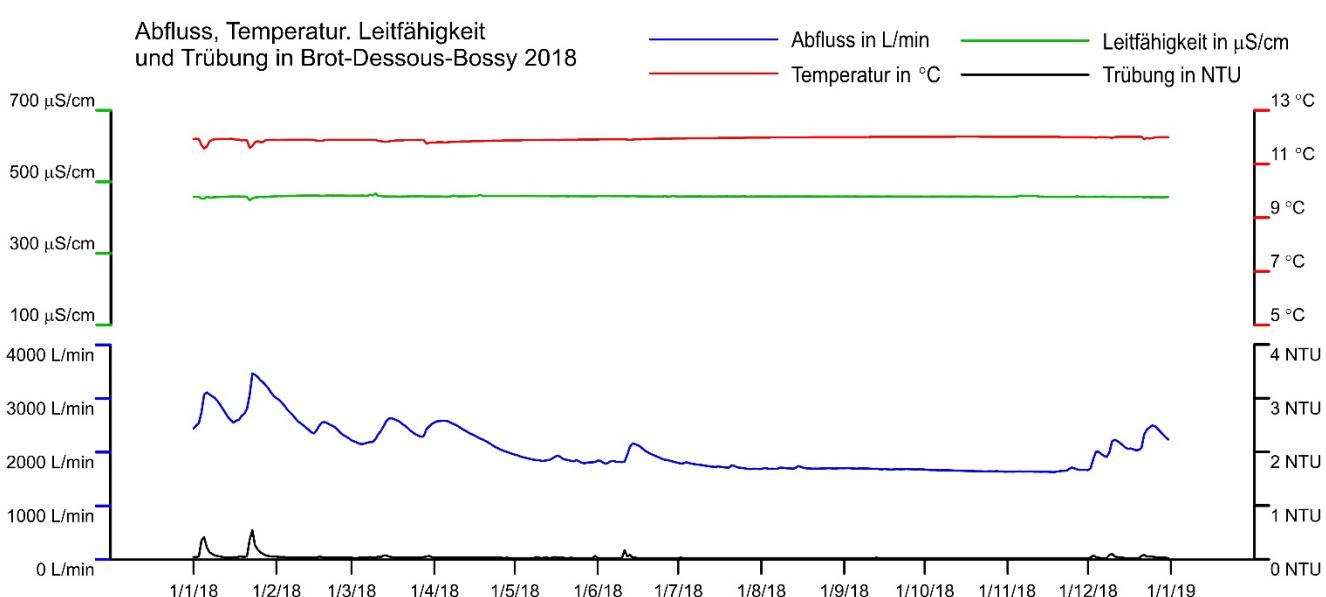
Das Thermogramm von SB lässt einen Jahreszyklus mit mässigen Schwankungen erkennen (5,6–6,4 °C). Die Durchschnittstemperatur (~6 °C) ist etwas tiefer als die durchschnittliche Aussentemperatur am Standort (~7 °C). Fast systematisch fallen die Hochwasserspitzen mit sinkender Wassertemperatur zusammen. Die mässigen

Schwankungen weisen auf eine im Wesentlichen diffuse Neubildung hin (keine grösseren Schluckstellen), während die systematisch kälteren Hochwasserspitzen auf einen ungesättigten Bereich von > 200 m Mächtigkeit schliessen lassen. Die Wassertemperatur ist kälter als das Jahresmittel am Messstandort, was darauf zurückzuführen ist, dass das Einzugsgebiet mehrheitlich deutlich höher liegt als die Quelle.

Abbildung 14

Hydrogramme und chemisch-physikalische Parameter von drei BAFU-Messstellen an Quellen/Fassungen im Karstgebiet. Alle Temperatur- und Leitfähigkeitskurven weisen dieselben Skalen auf. Nicht so bei den Abfluss- und Trübungswerten, bei denen die Unterschiede zu gross sind.





Elektrische Leitfähigkeit

Bei MIL beträgt die elektrische Leitfähigkeit durchschnittlich 610 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (560–670 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Die Schwankungen treten ziemlich rasch auf und stimmen in der Regel mit Hochwasserepisoden überein. Bei Hochwasser im Winter nimmt sie ab, im Sommer und Herbst wieder zu. Der hohe Mittelwert weist auf ein Einzugsgebiet mit einer CO₂-reichen Deckschicht hin, das also relativ tief liegt (400 bis max. 700 m ü. M.) und weitgehend von Kulturland bedeckt ist.

In BOS beträgt der Mittelwert ~450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei minimalen Variationen im Jahresverlauf. Dies deutet auf ein Einzugsgebiet mit einem mässigen CO₂-Gehalt hin, das also relativ hoch liegt (700–1000 m ü. M.) und wohl mehrheitlich bewaldet ist, weil im Waldgebiet der CO₂-Partialdruck im Boden kleiner ist als bei Kulturland. Die sehr geringen Variationen ergeben sich aus einer äusserst diffusen Infiltration und Exfiltration.

In SB beträgt die elektrische Leitfähigkeit durchschnittlich rund 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei einer grossen relativen Schwankung (130–260 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Angesichts einer Leitfähigkeit, die auf über 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ansteigt, muss das Einzugsgebiet teilweise im Mittelgebirge liegen, das eine ziemlich dünne, aber klar nachweisbare Bodenschicht aufweist, in der das Wasser mit CO₂ angereichert wird. Ein anderer Teil des Einzugsgebiets muss auf über 1700 m ü. M. liegen und nackte Kalkflächen aufweisen, die zu einer Leitfähigkeit von ungefähr 100 bis 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ führen.

Trübung

Die Trübung bei den Karstaustreten ergibt sich aus der Reaktivierung von Feinstoffen, die sich im Karstnetz abgelagert hatten (autochthone Trübung) und/oder dem Eintrag von getrübtem Oberflächenwasser, das bei Hochwasser ins Karstmassiv eindringt (allochthone Trübung). Die autochthone Trübung ist vor allem von der Hydraulik im Karströhrensystem abhängig, während es bei der allochthonen Trübung eher die Verhältnisse der Bodenerosion sind, die je nach Jahreszeit, Unwetterereignissen, landwirtschaftlichen und anderen Aktivitäten erheblich variieren. Deshalb ist es oft schwierig, schwankende Trübungswerte zu deuten.

In MIL weist die Trübung erhebliche Schwankungen auf und kann bei Hochwasserereignissen mehrere Tausend NTU erreichen. Eine grosszügige Bodenschicht ist eine wichtige Quelle von Feinstoffen, die in das Karstsystem

gelangen. Wahrscheinlich wird der Feinstoffabtrag und die Bodenerosion durch bestimmte landwirtschaftliche Aktivitäten noch verstärkt.

Das Wasser in BOS weist kaum Trübung auf (< 1 NTU). Möglicherweise liegen im Einzugsgebiet keine erosionsfördernden landwirtschaftlichen Aktivitäten vor und die allfälligen feinstoffeintragenden Ereignisse sind zu kurz und zu wenig ausgeprägt, als dass die Trübung bis zum künstlichen Entwässerungssystem gelangen würde, das die Fassung speist

In SB korrelieren die Trübungsschwankungen nur äusserst bedingt mit den Abflussschwankungen. Die höchsten Abflusswerte (Sommerschneeschmelze) fallen nicht mit den höchsten Trübungswerten zusammen. Diese werden vielmehr im Frühling und vor allem im Herbst gemessen, wenn bei Regenereignissen bodenbedeckte Gebiete zur Speisung der Quelle beitragen. Die Trübungsspitzen treten eindeutig später auf als die Hochwasserspitzen. Dies legt eine mehrheitlich allochthone Ursache nahe.

Bezug zur Vulnerabilität

Die drei Quellen werden von Einzugsgebieten gespeist, deren Infiltration im Wesentlichen diffus ist. Sie sind also nicht stark von konzentrierten, besonders hoch vulnerablen Schluckstellen betroffen. In BOS wird das Wasser offensichtlich indirekt gefasst, denn die chemisch-physikalischen Parameter sind äusserst stabil. Die Vulnerabilität des gesamten Einzugsgebiets ist hier wahrscheinlich klein. Das Einzugsgebiet von MIL scheint stark verkarstet zu sein, weist aber eine insgesamt mächtige Bodenschicht und wenig bis keine konzentrierte Infiltration auf. Damit handelt es sich um ein gesamthaft mässig vulnerables Einzugsgebiet. Das System der SB ist mit Sicherheit sehr verkarstet und nur mit einem dünnen Boden bedeckt, der in höheren Lagen ganz fehlt. Hier ist die Vulnerabilität insgesamt hoch.

A4 Schluckstellen in der Grundwasserschutzzone S1

A4-1 Einleitung

Die Vollzugshilfe sieht folgendes vor (BAFU, 2022; S. 8): «Die Grundwasserschutzzone S1 umfasst im Gegensatz zum bisherigen Schutzzonensystem nur die Fassungsanlage und ihre unmittelbare Umgebung, sowie Schluckstellen und deren unmittelbare Umgebung, wenn von diesen Schluckstellen eine Gefährdung für die Trinkwassernutzung ausgeht. Die Zone S2 wird nur als enger Bereich von mindestens 100 m in Zuströmrichtung um die Fassung ausgeschieden.»

Weiter heisst es (S. 16): «Die Zone S1 wird bei Schluckstellen nur ausgeschieden, wenn eine Gefährdung der Trinkwassernutzung besteht. Ob eine solche Gefährdung im konkreten Fall vorliegt, ist aufgrund von hydrologischen Kriterien wie versickerndes Wasservolumen, schnelle Verbindung zur Fassung usw. zu beurteilen. Beurteilungsgrundlagen dazu sind in der Praxishilfe «Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten» («EPIK-Methode») beschrieben.»

Diese Definition lässt der hydrogeologischen Fachperson einen gewissen Interpretationsspielraum. Nachstehend folgen einige Hilfsansätze für diese besondere Zuordnung.

A4-2 Grundsatz

Die Zone S1 rund um die Schluckstellen wird dort ausgeschieden, wo die Vulnerabilität höher ist als diejenige einer Zone Sh, die mit Schutzwerten von 0 bis 5 Punkten definiert ist. Die Voraussetzungen für die Ausscheidung einer Zone S1 gehen also über einen geringen Schutzwert (max. 2 Punkte) hinaus.

Sie ist also im Prinzip nur für Standorte möglich, die zur vulnerabelsten Klasse des Epikarsts gehören: Schacht mit aktiver Schluckstelle. In einem solchen Fall sind E und P = 0, weshalb für die Beurteilung lediglich Parameter K ins Gewicht fällt. Doch muss von der Zone eine Gefährdung für die Trinkwassernutzung ausgehen, wenn sie als S1 ausgeschieden werden soll. Dazu sind die EPIK-Schutzwerte allein nicht ausreichend.

Eine Schluckstelle, für die eine Zone S1 ausgeschieden werden soll, muss **alle** folgenden Voraussetzungen erfüllen:

- Sie ist perennierend.
- Mindestens 80 Prozent der Masse eines Tracers, die in das Schluckloch eingegeben wurde, tritt in der Gesamtheit aller Quellen dieses Karstsystems wieder zutage.
- Die Abflussmenge des Schlucklochs entspricht mindestens 20 Prozent der Wassermenge, die insgesamt in allen Quellen des Karstsystems zutage tritt.
- Die Fließdauer zwischen Schluckstelle und Fassung ist kleiner als 48 Stunden.

Wenn eine dieser Voraussetzungen nicht gegeben ist, wird für die Schluckstelle eine Zone Sh ausgeschieden, auch wenn ihr Schutzwert sehr klein ist (0–1 Punkt).

Schluckstellen, die alle Voraussetzungen erfüllen, sind äusserst rar, insbesondere solche, die in Zuströmrichtung einer Trinkwasserfassung liegen.

A5 Drei Anwendungsbeispiele (La Brévine, Tsanfleuron und St-Imier)

A5-1 Einleitung

Drei Einzugsgebiete wurden versuchsweise mit dem halbautomatischen Vorgehen der Methode EPIK 2.0 untersucht. Ziel war es, die Anwendbarkeit der Methode zu testen und die Schlüssigkeit der gewählten Kriterien für einzelne Einzugsgebiete in ziemlich unterschiedlichen Umgebungen (Jura und Alpen) zu validieren.

Die erstellten Karten wurden nicht durch spezifische Feldkenntnisse bestätigt oder wesentlich angepasst (Arbeit der hydrogeologischen Fachperson). Damit dienen sie lediglich als Beispiele und stellen für die drei Standorte keinesfalls definitive oder amtliche Schutzzonenkartierungen dar.

In den letzten Jahren wurde die Ausscheidung für einige Einzugsgebiete von Trinkwasserfassungen revidiert. Diese aktualisierten Fassungen wurden hier nicht berücksichtigt.

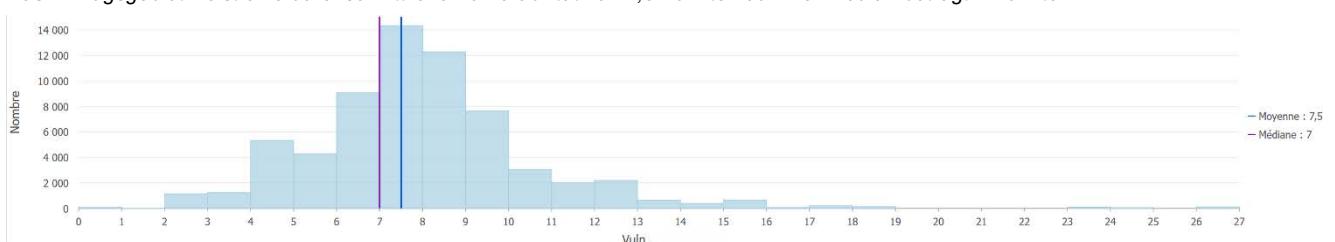
Für jedes Beispiel werden die Karten E, P, I und K sowie die aus ihrer Kombination ermittelte Vulnerabilitätskarte (Schutzzpunkte) vorgestellt. Zur weiteren Veranschaulichung und als Beispiel wird auch die Schutzzonenkarte abgebildet.

Zum Schluss werden einige Sonderfälle besprochen, die interpretationsbedürftig sind.

A5-2 Resultat für die Region St-Imier (Raissette-Quelle, Cormoret)

Das Abflusssystem umfasst die Raissette-Quellfassung in Cormoret, aber auch mehrere Überläufe bei der Dou- und bei der Torrent-Quelle.

Das Einzugsgebiet weist eine durchschnittliche Vulnerabilität von 7,5 Punkten auf. Der Median beträgt 7 Punkte.



Zu den vulnerablen Bereichen zählen:

- Einzugsgebiete der Schluckstellen und Sickerstellen. Gewisse Sickerstellen werden lediglich vermutet.
- Dolinen, Schluckstellen und Gebiete ohne Boden.

Das übrige Einzugsgebiet liegt in Bereichen mit diffusem und halbdiffusem Abfluss, deren Schutzwert durch den Boden und den Epikarst gegeben ist.

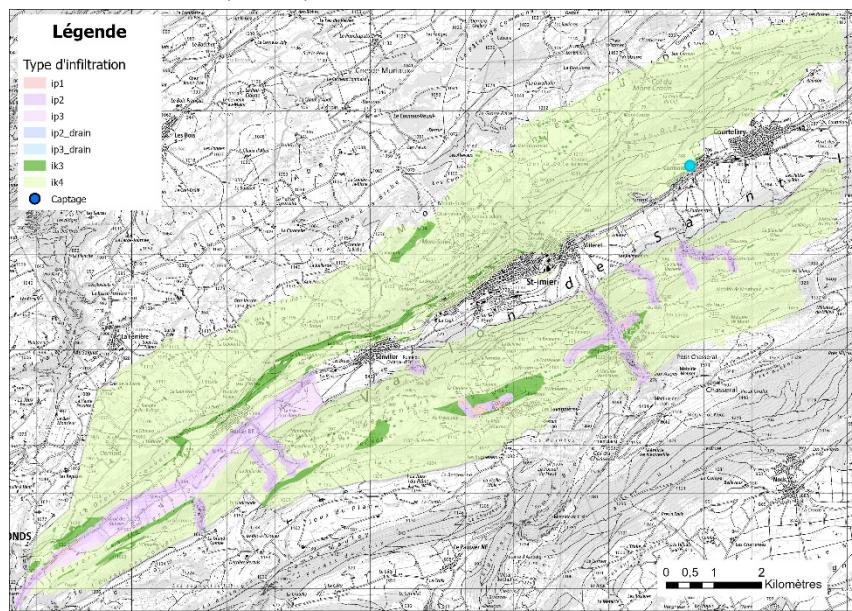
Auf den nächsten Seiten folgen die I-, P-, E- und K-Karten, die Vulnerabilitätskarte sowie die unverbindliche Schutzzonenkarte.

Die finale Karte weist für das Einzugsgebiet grösstenteils die Schutzzone Sm aus. Die Zonen Sh sind auf Gebiete mit geringmächtigem Boden beschränkt, die im Umfeld der Fassung (K = 1) oder bei den Bachläufen liegen, die

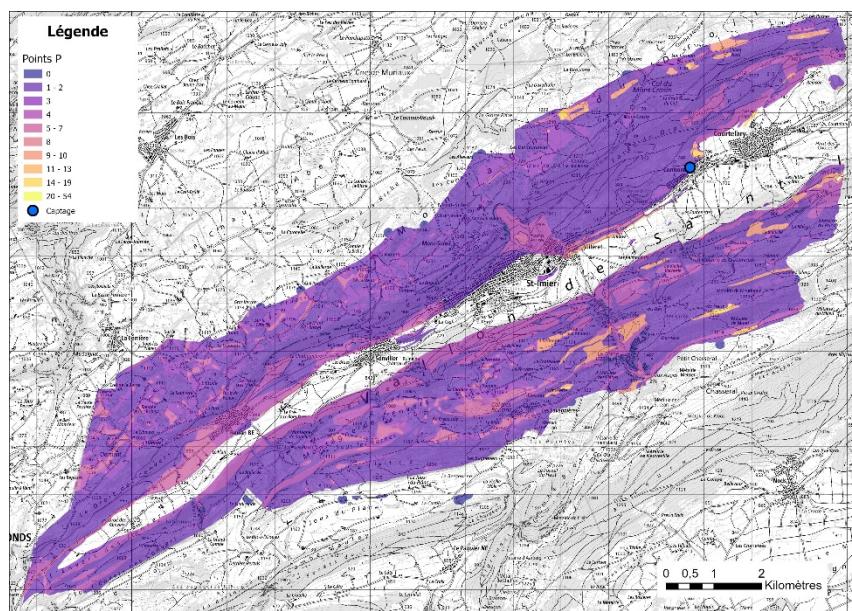
vermutete Schluckstellen speisen. Davon entspricht ein grosser Teil vermuteten infiltrierenden Fliessgewässern, die von einer feldkundigen hydrogeologischen Fachperson allfällige ergänzt werden könnten.

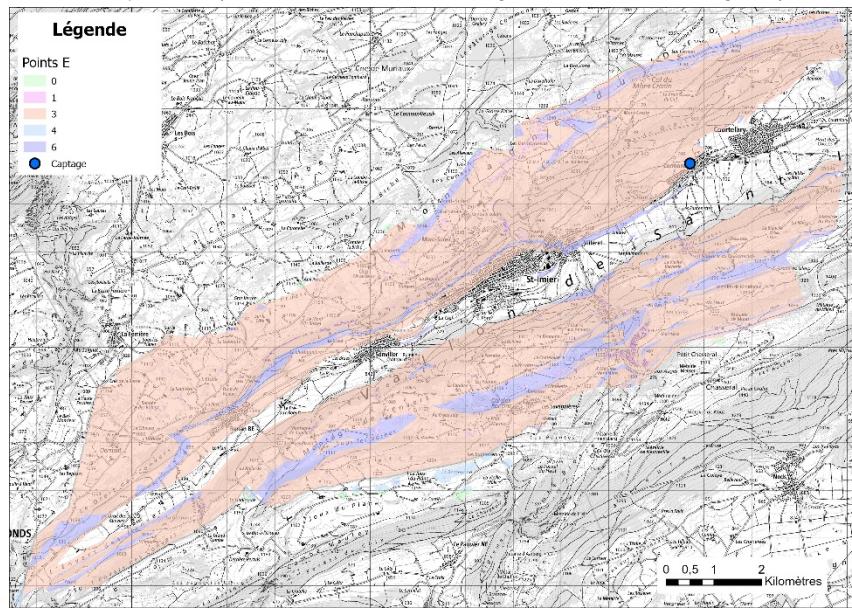
Für gewisse Mergelgebiete mit quartären Ablagerungen, die mehr als 15 Schutzbpunkte erhalten, werden die Schutzbereiche Au oder Ao ausgeschieden.

Parameter Infiltration I (I_p und I_k)

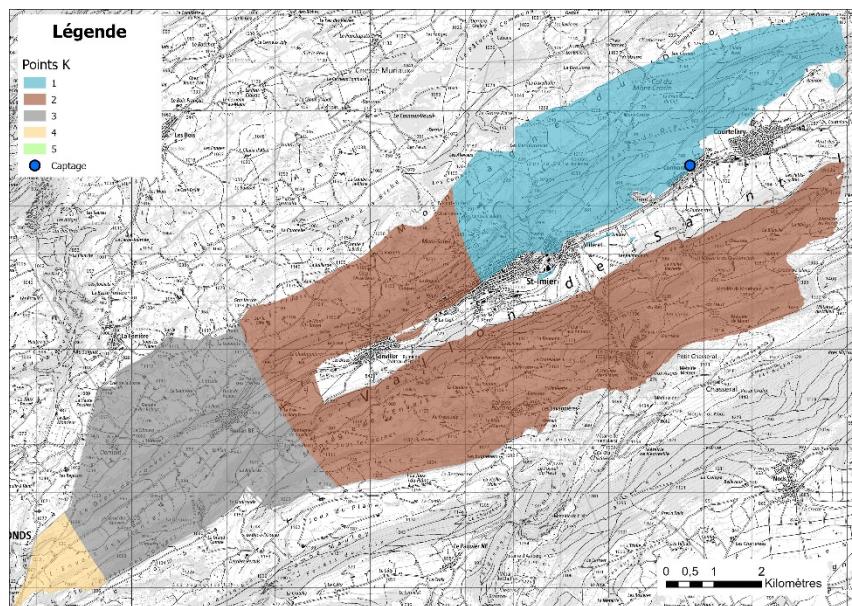


Parameter Protektion P (in Zonen I_p nicht berücksichtigt; in Zonen I_k3 durch 2 geteilt)

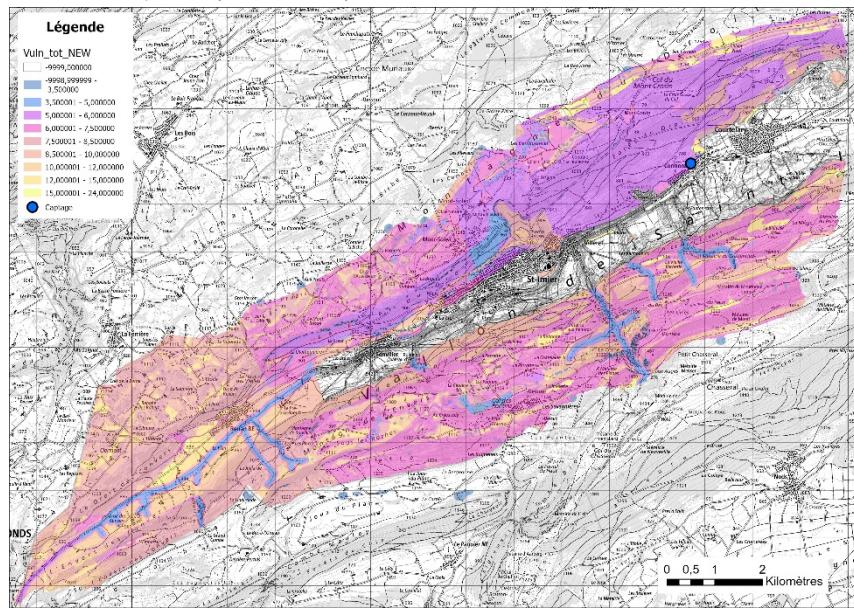


Parameter Epikarst E (in Zonen I_p nicht berücksichtigt; in Zonen I_k3 durch 2 geteilt)

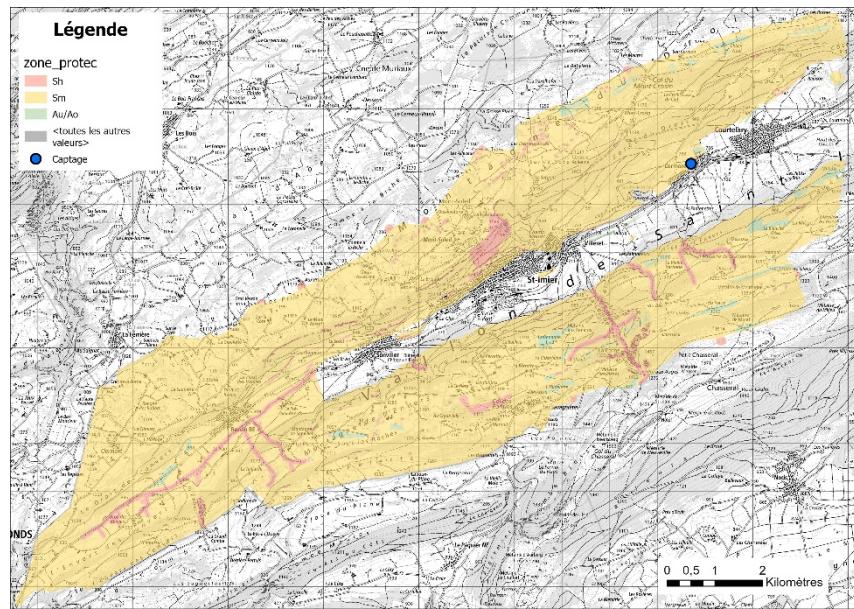
Parameter Karstnetz K



Anzahl Schutzbpunkte (Vulnerabilität)



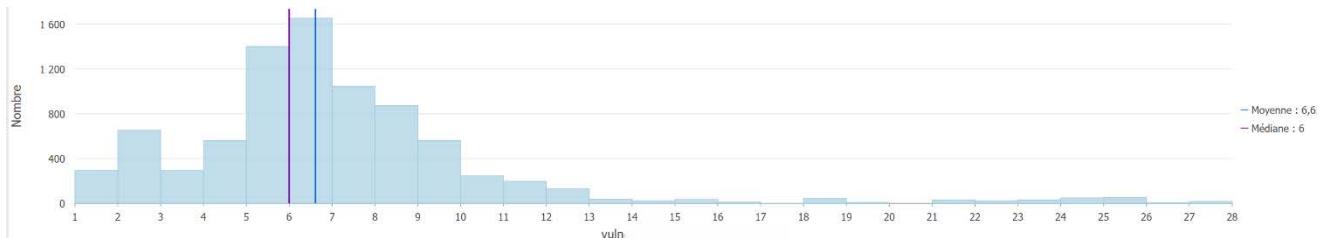
Unverbindliche Schutzzonenkarte (aufgrund der Vulnerabilität)



A5-3 Resultate für das Einzugsgebiet des Förderbrunnens in La Brévine

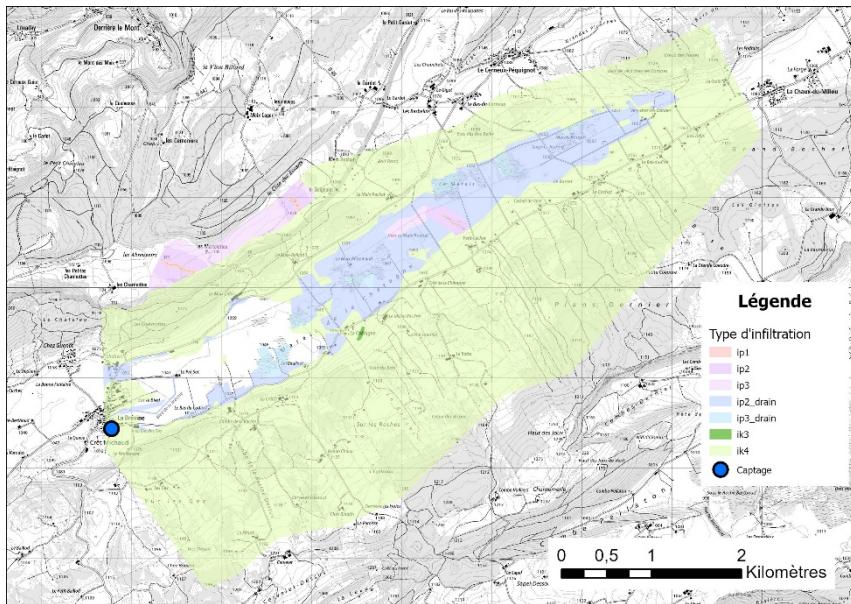
Untersucht wurde das Einzugsgebiet des Förderbrunnens in La Brévine, der das Grundwasservorkommen des La-Brévine-Tals erschliesst. Das Gebiet umfasst ein grossflächiges Feuchtgebiet, das in Schluckstellen entwässert wird (Drainage), weshalb es relativ vulnerabel ist. Schutz bietet einzig der Boden über den Drainagerohren und bis zu einem gewissen Grad das Karstnetz. Sehr vulnerabel sind daher die Einzugsgebiete der Schluckstellen und der entwässerten Gebiete in der näheren Fassungsumgebung.

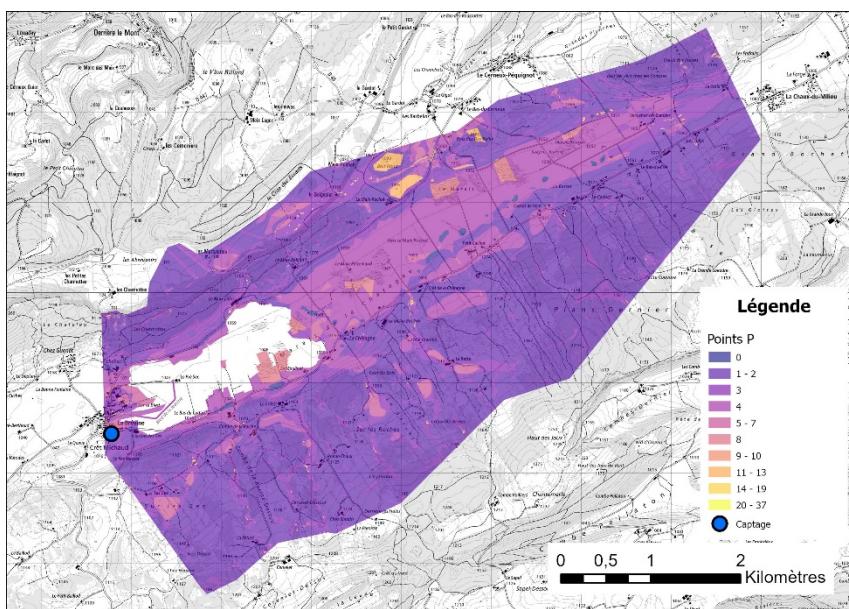
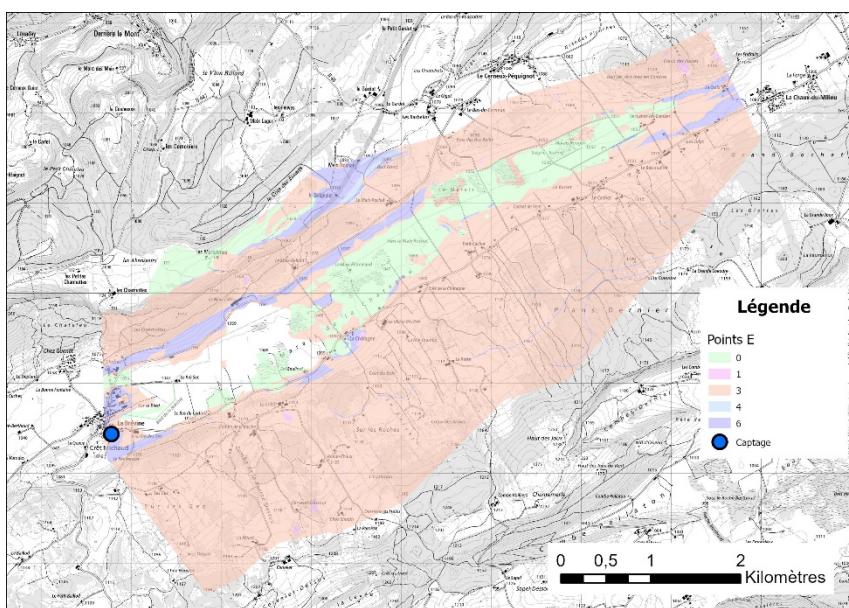
Das Einzugsgebiet weist eine durchschnittliche Vulnerabilität von 6,6 Punkten auf. Der Median liegt bei 6 Punkten.



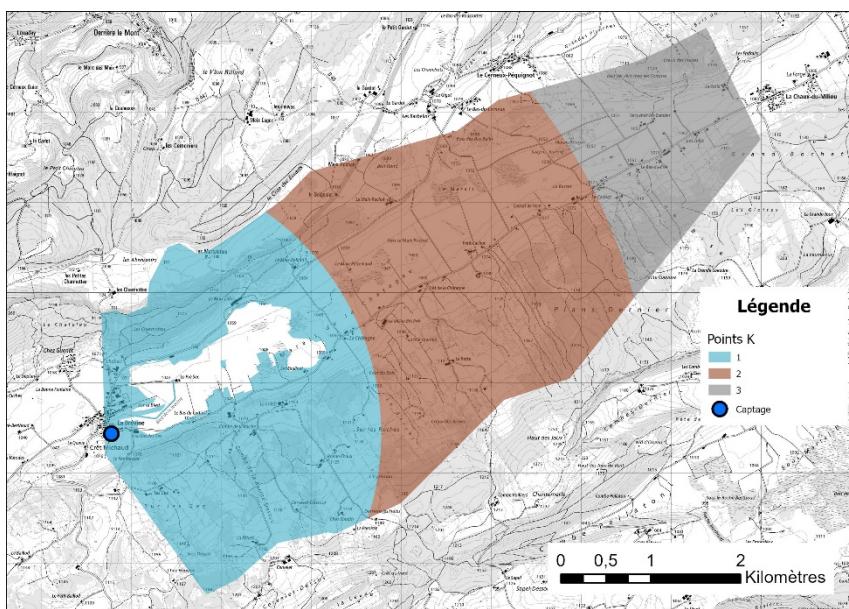
Das Einzugsgebiet liegt nur zu einem kleinen Teil in der Zone Sh (< 5 Vulnerabilitätspunkte). Dagegen ist die Zone mit 5 bis 6 Vulnerabilitätspunkten gross, und eine geringfügige Änderung bei der Bewertung der Bodenmächtigkeit über den Drainagerohren würde zu einer deutlich grösseren Zone Sh führen.

Parameter I (I_p und I_{k3})

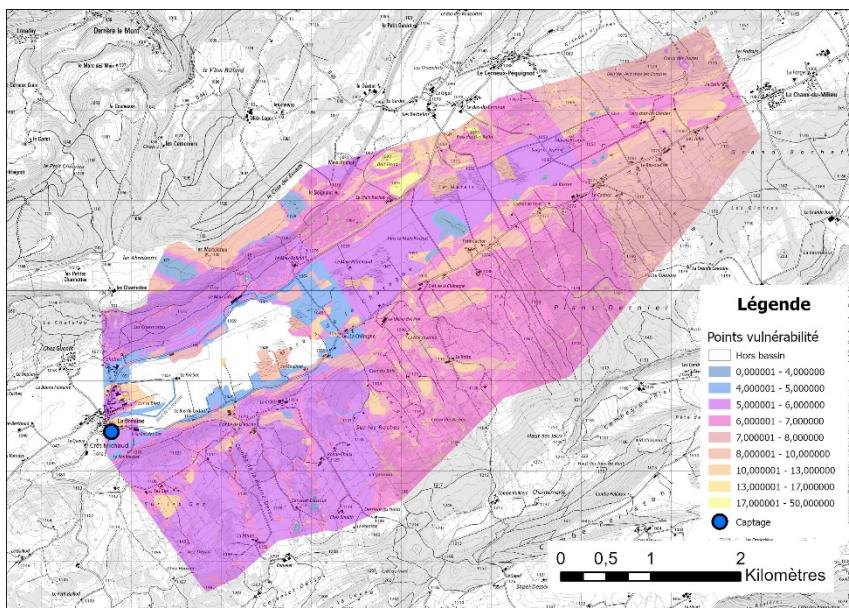


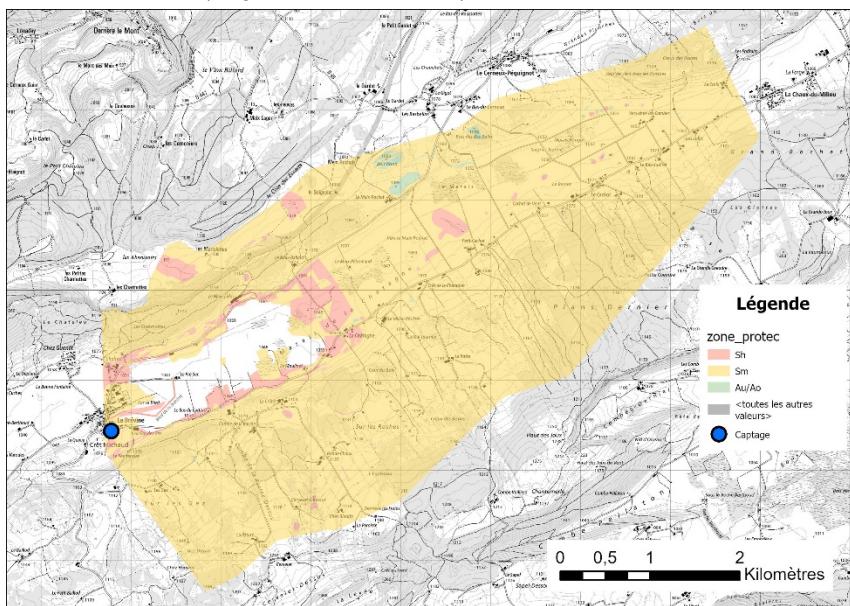
Parameter Protektion P (in Zonen I_p nicht berücksichtigt; in Zonen I_{k3} durch 2 geteilt)Parameter Epikarst E (in Zonen I_p nicht berücksichtigt; in Zonen I_{k3} durch 2 geteilt)

Parameter Karstnetz K



Anzahl Schutzbpunkte (Vulnerabilität)



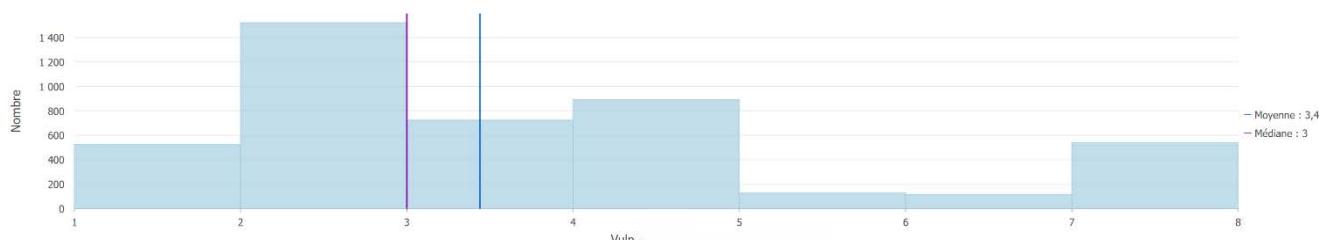
Art der Schutzzonen (aufgrund der Vulnerabilität)**A5-4 Resultate für die Region Tschamfleuron, Glarey-Fassung**

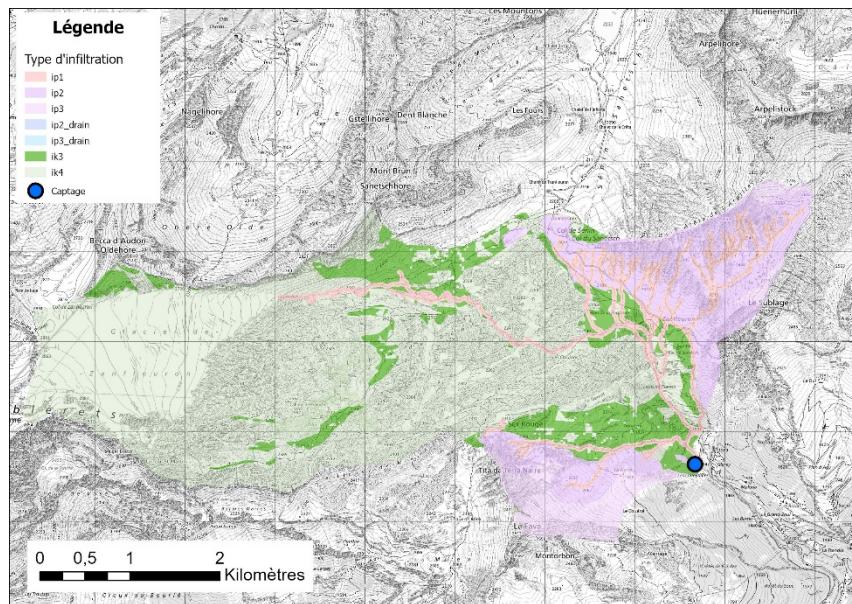
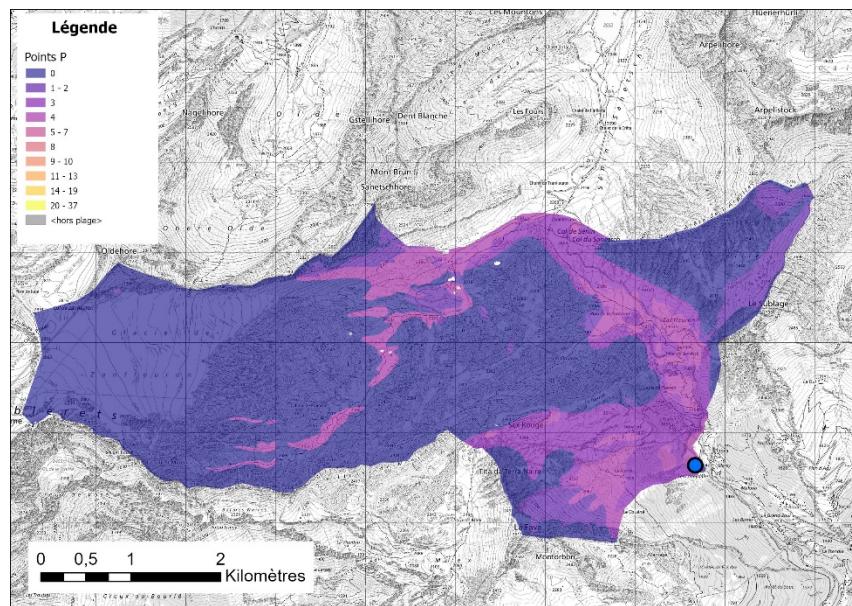
Für dieses Gebiet existierten keine Karstkarte und keine Karte der Deckschichtmächtigkeit. Deshalb wurde die Mächtigkeit aufgrund des Vorhandenseins von Boden (Layer Bodendurchlässigkeit) und von quartären Ablagerungen (GeoCover) geschätzt.

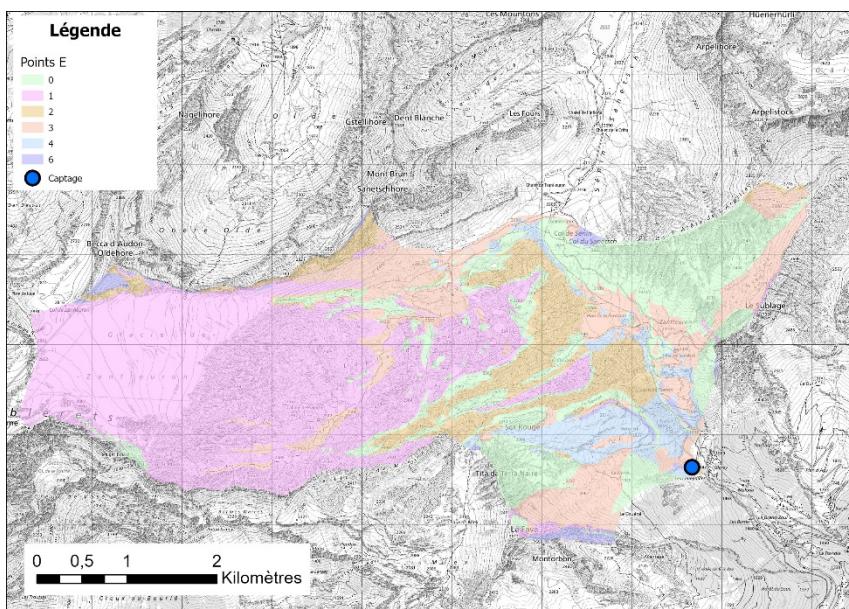
Das geschätzte Einzugsgebiet besteht mehrheitlich aus Felsaufschlüssen. Obschon die Infiltration grundsätzlich diffus erfolgt, müssen grosse Flächen als hoch vulnerabel eingestuft werden.

Dieses Einzugsgebiet weist eine durchschnittliche Vulnerabilität von 3,4 Punkten auf. Der Median liegt bei 3 Punkten. Die tieferen Werte als im Jura gehen auf die kleinere Bodendecke zurück.

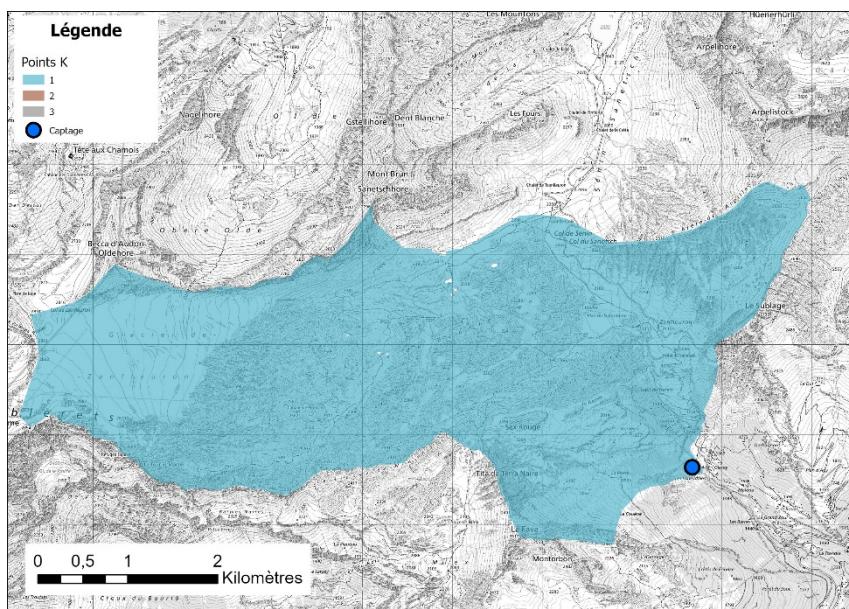
Für I_p beträgt die durchschnittliche Vulnerabilität 4,0 Punkte.

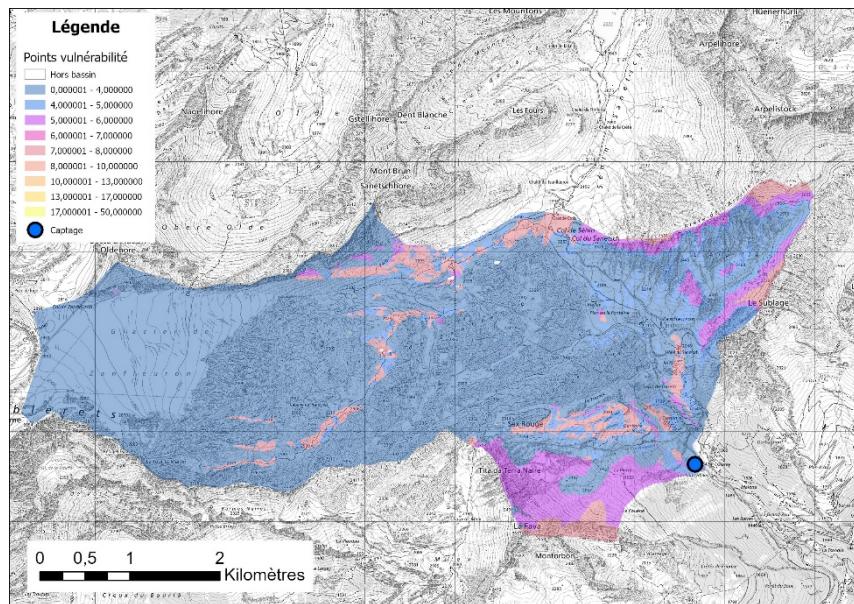
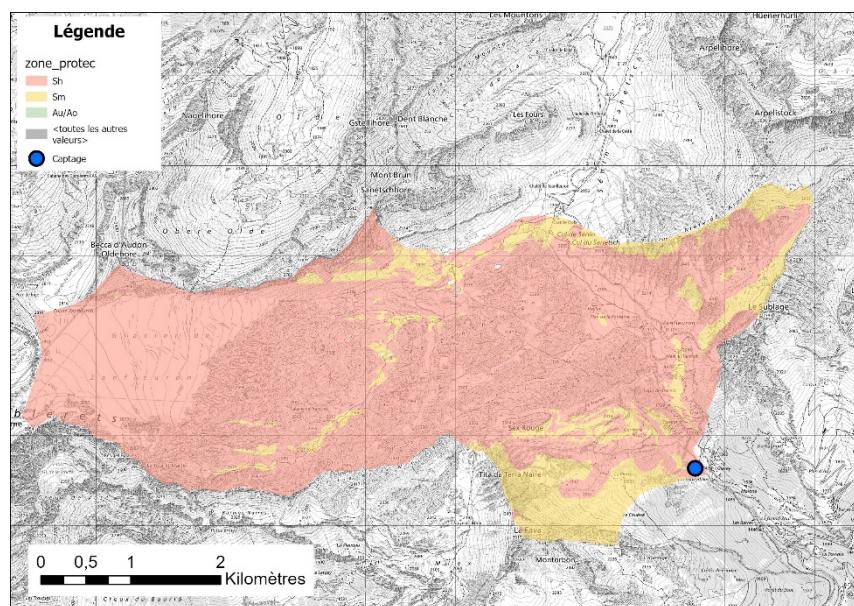


Parameter Infiltration I (I_p und I_k)Parameter Protektion P (in Zonen I_p nicht berücksichtigt; in Zonen I_k3 durch 2 geteilt)

Parameter Epikarst E (in Zonen I_p nicht berücksichtigt; in Zonen I_{k3} durch 2 geteilt)

Parameter Karstnetz K



Anzahl Schutzbpunkte (Vulnerabilität)**Art der Schutzzonen (aufgrund der Vulnerabilität)**

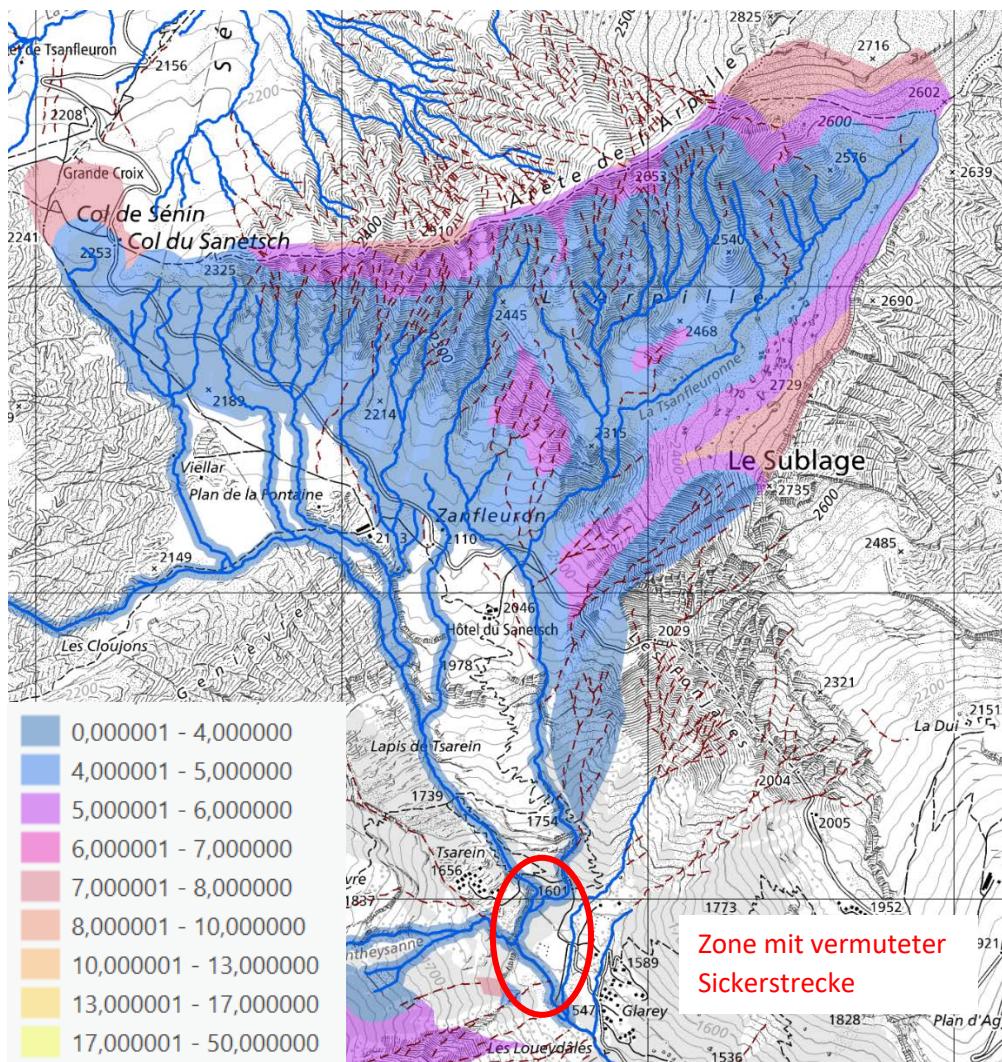
A5-5 Spezialfälle

Tsanfleuron: Bachlauf im nicht verkarsteten Gebiet

In der nachstehenden Abbildung wird der östliche Teil des Fassungseinzugsgebiets dargestellt. Unten sind ein Bereich mit vermuteter Sickerstrecke eines Bachlaufs sowie die speisenden Fließgewässer samt ihrem Einzugsgebiet ersichtlich.

Hier wird die Sickerstrecke durch ein umfangreiches Gewässernetz aus dem nicht verkarsteten Gebiet gespiesen. Weil sie nur vermutet wird und diffus ist, wird davon ausgegangen, dass lediglich ein kleiner Teil des Wassers bis dahin und bis zur Fassung gelangt. Für die Sickerstrecke werden dem gesamten Einzugsgebiet 2 zusätzliche Schutzhaltungen zugewiesen. Dieser Wert könnte aufgrund weiterer Abklärungen verändert werden.

Auszug aus der Vulnerabilitätskarte (Gesamtpunktzahl) im Gebiet der L'Arpille-Tonsteine und -Mergel. Der Abfluss wird als konzentriert bis halbkonzentriert vermutet (I_p1 , I_p2 , I_p3). Den Einzugsgebieten der Fließgewässer (blaue Linien) und Rinnen (braun gestrichelt) wurden Schutzhaltungen zugeordnet (farbige Flächen). Die vermutete Sickerstrecke ist mit einem roten Kreis markiert. Die ungefärbten Bereiche sind entweder verkarstet (diffuse Infiltration) oder liegen ausserhalb des Einzugsgebiets der Glarey-Fassung.



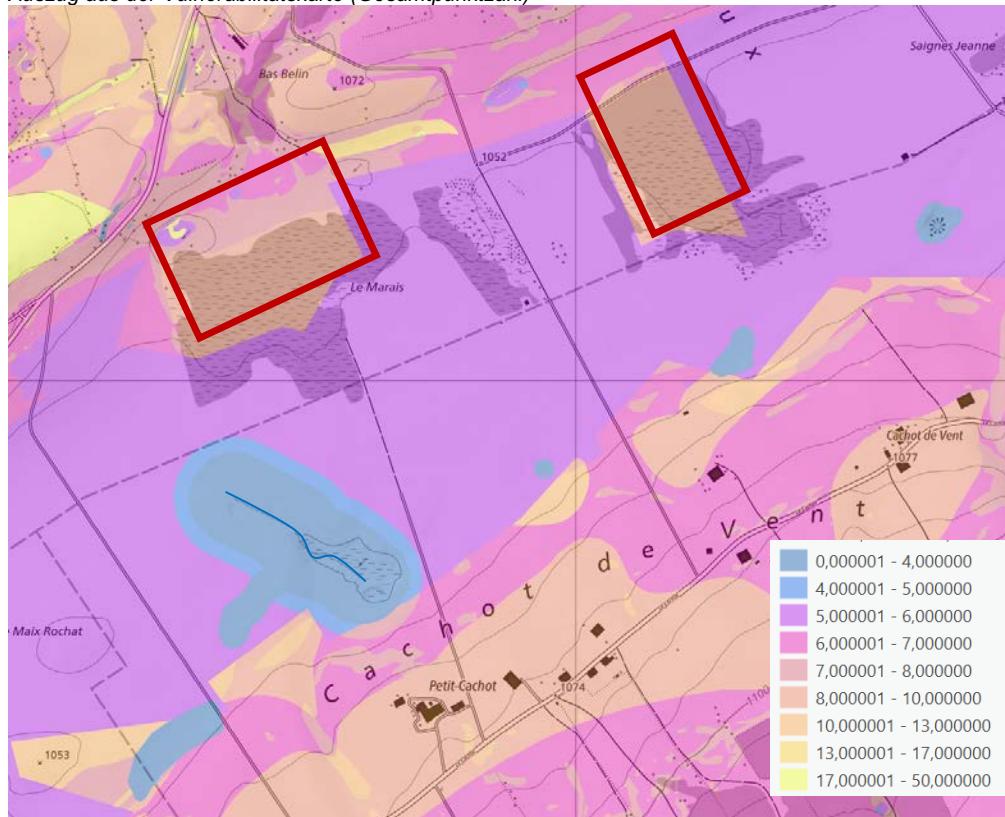
La Brévine: Drainage mit Ableitung in Schluckstellen

In den entwässerten Bereichen, die das Wasser direkt in Schluckstellen ableiten, ergibt sich die Schutzwirkung aus der Bodenmächtigkeit über den Drainagerohren ($P = 4$) und dem Abstand bis zur Fassung ($K = 2$). Sie wird hier mit 6 Punkten gewertet. Die Bereiche im Umfeld der Schluckstellen werden nur durch das Karstnetz geschützt ($K = 2$).

Ein kleiner Bachlauf (blaue Linie) ergiesst sich in eine Schluckstelle (I_p1 und I_p2).

Die unentwässerten Feuchtzonen (geschütztes Moor; rote Rechtecke) weisen eine geringe Vulnerabilität auf. Das Wasser dringt nicht in den Fels ein und läuft kaum ab, weil es im Moor zurückgehalten wird. Das kleine Abflussvolumen gelangt indirekt in die Schluckstellen. Es wird durch die mächtige Bodendecke gemindert ($P = 8$).

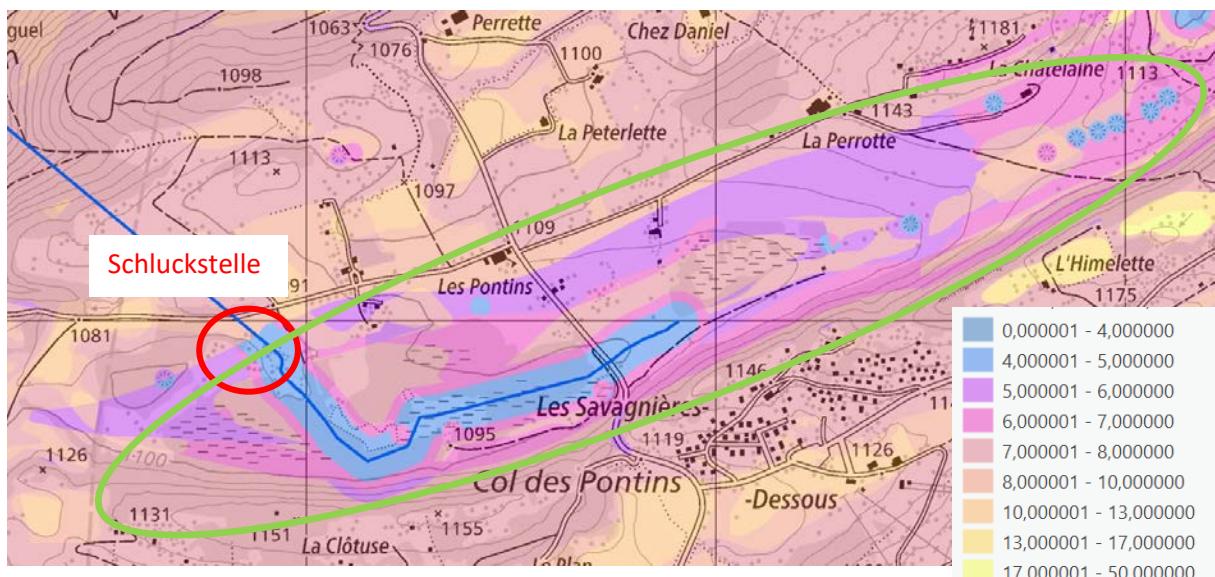
Auszug aus der Vulnerabilitätskarte (Gesamtpunktzahl)



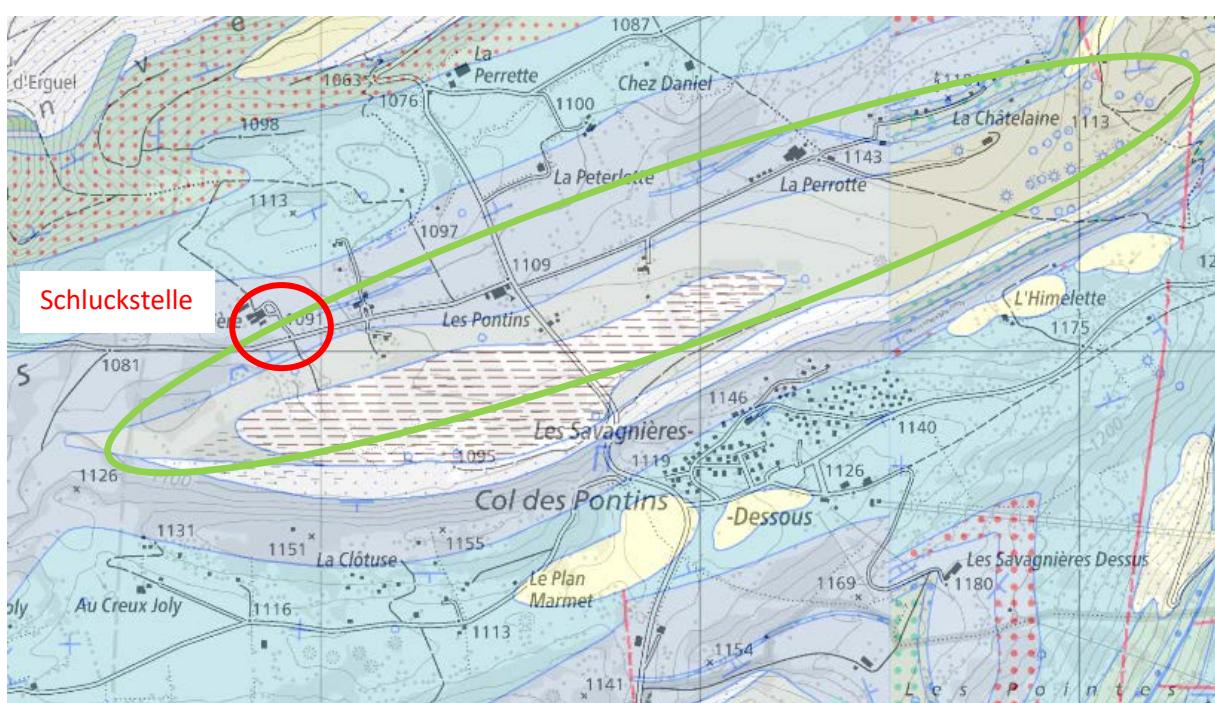
St-Imier: Mergelgebiet und Mergelgestein mit Schluckstellen

Das Mergelgebiet ist teilweise sumpfig (grün umrandet) und weist zahlreiche Dolinen, Schluckstellen und kleinere Bachläufe auf. Die nahe Umgebung des Bachlaufs wird als Einzugsgebiet der Schluckstelle gewertet (I_{p2}). Die entfernteren Bereiche innerhalb des topografischen Einzugsgebiets werden wegen Anzeichen von partiell direkter Infiltration als halbdifuser Abfluss gerechnet (I_{k3}). Mehrere Dolinen stellen halbkonzentrierte Infiltrationspunkte dar (blau).

Auszug aus der Vulnerabilitätskarte (Gesamtpunktzahl)

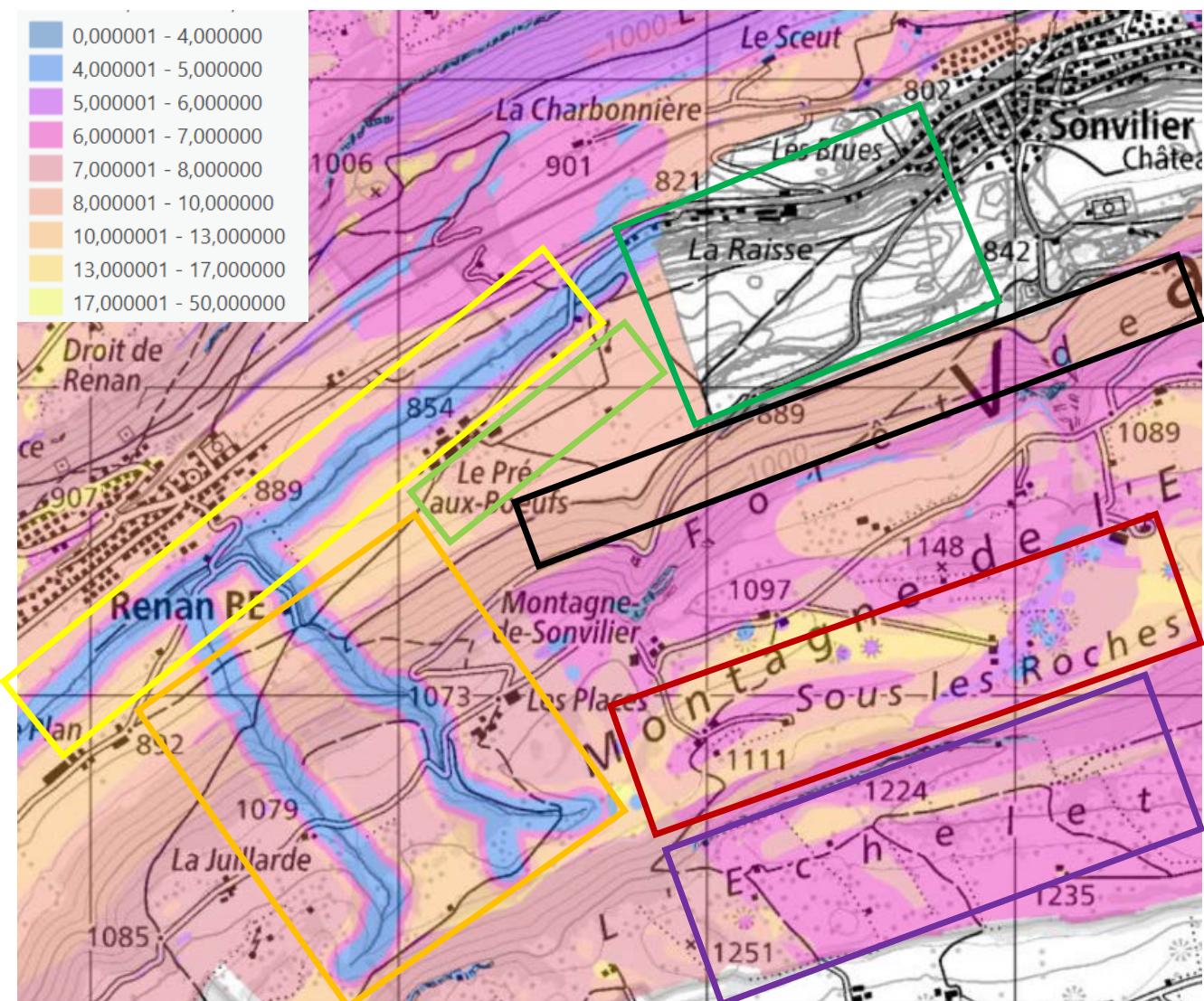


Geologische Karte GeoCover (swisstopo)



Weitere typische Verhältnisse in der Region Renan und Sonvilier

Auszug aus der Vulnerabilitätskarte (Gesamtpunktzahl)



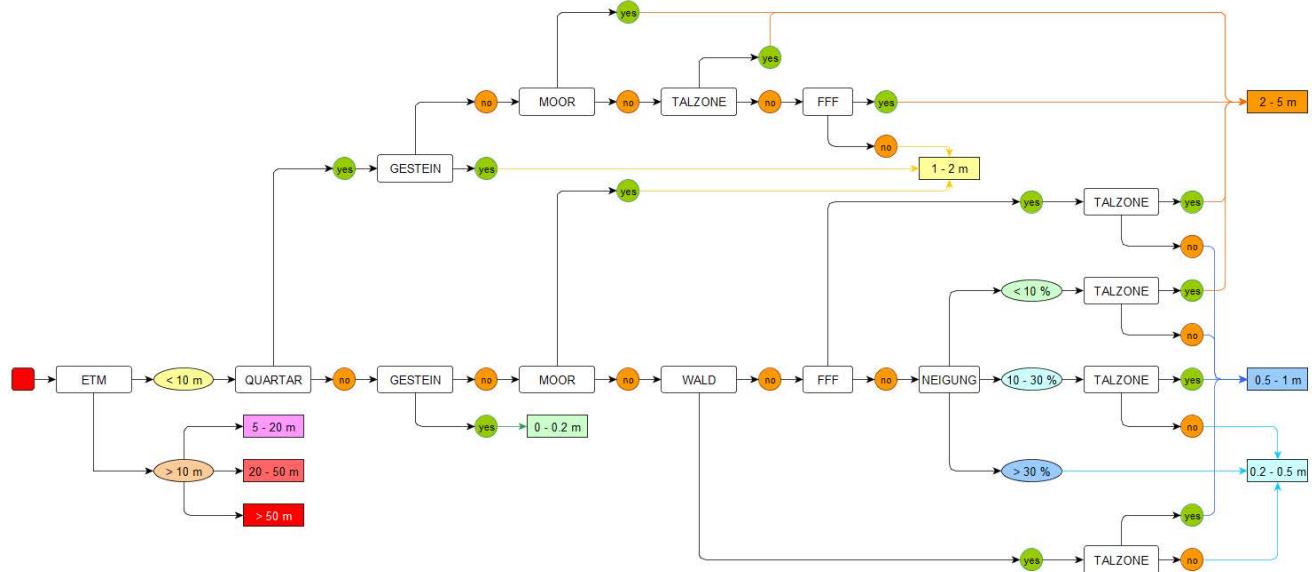
| Zone | Typ | Pts I | Pts P | Pts E | Pts K | Kommentar |
|------------|------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|---|
| Gelb | I _p 1, I _p 2 | 0-7 | Null | Null | 3 - 4 | Bachlauf (I _p 1) mit Sickerstellen und Gewässerumfeld (I _p 2) ≤ 100 m. |
| Orange | I _p 1, I _p 2 | 0-7 | Null | Null | 4 | Bachläufe gemäss GWN. Infiltrierendes Karstgebiet. Die Gewässer sind temporär, sammeln aber allfälliges Wasser. |
| Hellgrün | I _p 3 | 8 | Null | Null | 3 - 4 | Nicht verkarstet, aber alloogen, d. h. den Karst speisend. |
| Dunkelgrün | Ausserhalb EZG | - | - | - | - | Nicht verkarstetes, den Karst nicht speisendes Gebiet. Ausserhalb des Fassungseinzugsgebiets. |
| Rot | I _k 3 | Null | 2-7 | 6/1Doline | 3 - 4 | Mergelgebiet mit zahlreichen Dolinen als Hinweis auf Wasserverlust. |
| Violett | I _k 4 | Null | 2-7 | 3 | 3 | Verkarstetes wenig geneigtes Gebiet, mittlere Bodendurchlässigkeit. |
| Schwarz | I _k 4 | Null | 4 | 3 | 3 | Verkarstetes Waldgebiet in Hanglage, mittlere Bodendurchlässigkeit. |

A6 Automatisierte Kartierung der Deckschichtmächtigkeit

Gestützt auf bestehende Datenreihen, die das gesamte Landesgebiet abdecken, lässt sich automatisch eine Karte der Bodenmächtigkeiten erstellen. Dabei handelt es sich um eine Näherung, die nicht direkt durch Feldmessungen erhärtet ist. Sie kann eventuell unmittelbar verwendet werden oder als Grundlage für eine präzisere Kartierung dienen. Abbildung 15 stellt das diesbezügliche Entscheidungs- und Datennutzungsschema dar.

Abbildung 15

Erforderliche Daten und Prozessschritte für die Erarbeitung einer Karte der Deckschichtmächtigkeit (nach Hamedinger, 2019).



A7 Arbeiten mit dem GIS

A7-1 Grundsatz

Ein grosser Geodatenbestand, der das Gebiet mit recht hoher Präzision abdeckt, ermöglicht im Prinzip eine erste halbautomatische Kartierung der Parameter E, P, I und K. Insbesondere die topografischen und geologischen Daten sind verwertbar. Sie können in einem geografischen Informationssystem (GIS) heruntergeladen, zusammengestellt und kombiniert werden. Anhand der hier ausgeführten Regeln, die in Abbildung 9 (Kapitel 4.7) grafisch dargestellt sind, lassen sich für alle Punkte eines Fassungs- oder Quelleinzugsgebiets Schutzbpunkte zuordnen und so die Grundwasserschutzzonen ausscheiden. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in seiner Transparenz und Reproduzierbarkeit (sofern die Stammdaten nicht verändert werden). Mit geringem GIS-Programmieraufwand lassen sich relativ grosse Gebiete halbautomatisch verarbeiten. Weil kein Datenbestand vollkommen ist, müssen die fehlenden und fehlerhaften Daten der Karte mittels Fachwissen und Feldbegehung durch eine Fachperson korrigiert werden. Diese Fachperson sorgt dafür, dass die im halbautomatischen Verfahren erstellte Karte, die rein informativer Art ist, verlässlicher und dadurch validiert wird.

A7-2 Datenquellen

Parameter I betrifft die Infiltrationsverhältnisse und umfasst insbesondere die Bestimmung der Gebiete mit Schluckstellen und konzentrierter Infiltration samt deren Einzugsgebieten. Es handelt sich dabei also um einen Eckwert der Methode EPIK 2.0. Der diesbezügliche Datenbestand ist für die Erstellung einer zufriedenstellenden Karte oft unzureichend, denn die Schluck- und Sickerstellen sind nur selten kartiert, ihre Einzugsgebiete noch weniger. Daher ist das Know-how der ortskundigen Fachperson äusserst wichtig, um die Stammdaten zu ergänzen und zu korrigieren.

Parameter K lässt sich anhand der Distanzen gut automatisch kartieren, muss aber oft mit Markierversuchen korrigiert werden.

Für Parameter P und E sind die Geodaten am nützlichsten. Als Grundlage für ihre Bewertung dient die «Karstkarte» (SISKA, 2022) zusammen mit einigen ergänzenden Daten.

Tabelle 7.1 enthält die Variablen, die zur Ermittlung der Parameter E, P, I und K erforderlich sind, sowie die digitalen Datenquellen, die für die ganze Schweiz zur Verfügung stehen. Es handelt sich hierbei um Vorschläge. Weitere, insbesondere lokale Datenquellen können ebenfalls verwendet werden. Die letzte Spalte informiert darüber, welche Daten direkt in der Karstkarte vorliegen. Falls eine solche besteht, kann sie als Grundlage für die Methode EPIK 2.0 dienen.

Tabelle 9*Parameter und Daten für die Anwendung der Methode EPIK 2.0*

| Parameter (Output) | Datenbedarf (Variablen) | Datenquelle (Vorschlag) | In Karstkarte vorhanden |
|--------------------|---|---|-------------------------|
| Studiengebiet | Einzugsgebiet Fassung/Quelle | Kartieren (Anhang A2) | Non |
| | Bodenart | GeoCover, Art der zu kartierenden Felsformationen mit Deckschicht (definieren, ob verkarstet, halbverkarstet, nicht verkarstet) | Ja, D_INFILTR |
| | Allogene Gebiete | Kartieren | Ja, EZGG |
| | Subartesische, exfiltrierende Gebiete | Kartieren | Ja, SubArtes |
| I | Schluckstellen | GeoCover, hydrogeologische Karte, evtl. Feld | Nein |
| | Infiltrierende Seen | Hydrogeologische Karte | Ja, EZGG |
| | Sickerstellen (Fließgewässer) | Hydrogeologische Karte, evtl. Feld | Ja ⁵ , GW25 |
| | Allogene Gebiete | Kartieren | Ja, EZGG |
| | Hang und Hangfuss | Aufgrund von DHM (Hang-Tool) berechnen und zuordnen | Nein |
| | Waldvorkommen | Vector-25-Primärflächen | Ja, D_INFILTR |
| | Oberflächenabfluss | Mit Hangneigung und Durchlässigkeit berechnen (Tabelle 10) | Nein |
| | Drainage | Daten Kantone oder Agroscope (Drainagekarte Schweiz) | Nein |
| P | Mächtigkeit der Deckschicht (Boden und quartäre Ablagerungen) | GeoCover, berechnen nach Anhang 5; evtl. Feld zur Validierung | Ja, D_INFILTR |
| | Art der Deckschicht (Boden und quartäre Ablagerungen) | Bodeneignung : Kulturtyp, Geocover | Ja, D_INFILTR |
| | Durchlässigkeit der Deckschicht (Boden und quartäre Ablagerungen) | Boden – Bodeneignung: Kulturtyp (neu zuordnen) Quartäre Ablagerungen – nach GeoCover-Eigenschaften definieren | Nein |
| E | Bodenart | GeoCover, Art der zu kartierenden Felsformationen mit Deckschicht (definieren, ob verkarstet, halbverkarstet, nicht verkarstet) | Ja, D_INFILTR |
| | Mächtigkeit der Deckschicht (Boden und quartäre Ablagerungen) | GeoCover, berechnen nach Anhang 5; evtl. Feld zur Validierung | Ja, D_INFILTR |
| | Verwitterung | Mächtigkeit der Bänke (stratigrafische Kolonnen – strati.ch), andere | Nein |
| | Karrenfeld | Kartieren oder Annähern (Karstböden, keine lockere Deckschicht) | Nein |
| | Doline | GeoCover, topografische Karte, kantonale Inventare, evtl. kartieren | Nein |
| | Höhlen | GeoCover, topografische Karte, speläologische Inventare | Nein |
| K | Ungesättigter Bereich, unterirdischer Bachlauf, gesättigter Bereich | Markierversuche oder berechnen gemäss allgemeinen EPIK-Empfehlungen (Kap. 4.6) | Nein |

⁵ Einstweilige Schätzung des Infiltrationspotenzials der Fließgewässer im Karstgebiet; Felderhebungen wären wünschenswert.

A7-3 GIS-Tools und schrittweise Anwendung

Tabelle 7.2 zeigt eine mögliche Vorgehensweise samt den vorliegenden GIS-Tools. Als erster Arbeitsschritt wird das Einzugsgebiet bestimmt, auf das sich die Studie bezieht (Studiengebiet). Der zweite Arbeitsschritt (Datenerhebung) ist am aufwändigsten und umfasst die Sammlung, Formatierung und Kategorisierung der Variablen. In einem dritten Schritt werden die vier Parameter E, P, I und K anhand unterschiedlicher Kombinationen bewertet. In einem vierten und letzten Schritt werden die Summen der Schutzbpunkte berechnet und in Grundwasserschutzzonen umgewandelt. Bei jedem Schritt wird zur weiteren Information auf die entsprechenden Kapitel und Tabellen des vorliegenden Berichts verwiesen.

In der Praxis können in Python eine Toolbox oder Scripts erstellt werden, um die Berechnungsarbeiten zu erleichtern und die Karten halbautomatisch zu generieren. Zudem ermöglicht die Zuordnung von «Domains» ein einfacheres Lesen der Attribute in Textform. Mit einem Symbologie-Layer (.lyrx) lässt sich die Karte leserlicher und einheitlicher ausgestalten.

A7-4 Korrekturen durch die hydrogeologische Fachperson

Mit etwas Routine und guter Beherrschung der GIS-Tools kann ziemlich einfach eine halbautomatische Vulnerabilitätskarte erstellt werden. Damit lassen sich in relativ kurzer Zeit grosse Gebiete bearbeiten. Auch wenn einige Arbeitsschritte eine fachkundige Interpretation erfordern, lässt diese Methode nur wenig Spielraum offen und liefert transparente, reproduzierbare Resultate.

Ausgehend von diesen ersten Ergebnissen bestimmt die hydrogeologische Fachperson, die Ortskenntnisse des Studiengebiets hat, diejenigen Gebiete, in denen die Stammdaten lücken- oder fehlerhaft sind. Um die Karte anzupassen, führt sie Literaturrecherchen, Feldbeobachtungen und Markierversuche durch.

Zur Gewährleistung der Transparenz erfasst sie ihre Ergänzungen und Korrekturen in zusätzlichen GIS-Layern. So ist ihr Beitrag nachvollziehbar dokumentiert, was spätere Anpassungen einfacher macht. Diese Layer enthalten alle Änderungen der Stammdaten, der Attribute und der finalen Vulnerabilitätswerte. Wird in der GIS-Routine beispielsweise ein Karrenfeld aufgrund der Stammdaten nicht als solches identifiziert, können die Schutzbpunkte für den Epikarst entsprechend angepasst werden. Recht häufig kommt es vor, dass einem Gebiet, das in GeoCover als Gletscher ausgewiesen ist, eine Lithologie und Infiltrationsart zugewiesen werden muss, weil das Eis seit der letzten Ausgabe der geologischen Karte verschwunden ist.

Tabelle 10*Arbeiten mit dem GIS: Arbeitsschritte*

| Arbeitsschritte | Ohne Karstkarte | Mit Karstkarte | Ref. Kapitel und Tabellen | ArcGIS-Tools (Vorschlag) |
|-------------------------|--|---|--|---|
| Studiengebiet | Einzugsgebiet der betroffenen Fassung bestimmen. Entspricht dem zu kartierenden Gebiet. | | Anhang A2 | Neues Shapefile |
| Datenerhebung | EPK-Shapefile wird erstellt. Alle notwendigen Variablen laut Tabelle 9 integrieren (ohne I- und I'-Variablen). | Direkt von Layer D_Infiltr aus gehen. Fehlende Variablen laut Tabelle 9 ergänzen (ohne I- und I'-Variablen). | Tabelle 9 | Feld, Definitionsgruppe gruppieren, verbinden |
| Erforderliche Variablen | Shapefile so clippen, dass es dem Studiengebiet entspricht. | | | Überlappung |
| Anpassung Studiengebiet | Gebiete mit vernachlässigbarer Vulnerabilität entfernen: subartesische, exfiltrierende Gebiete (keine Infiltration). | | | Löschen |
| I | Schluckstellen und Einzugsgebiete werden identifiziert und kartiert. | Schluckstellen werden identifiziert. Ihre Einzugsgebiete werden anhand der Infiltrationskapazität des Bodens berechnet. | Kapitel 4.3.2 Abbildung 6 Tabellen 1 und 2 | Definitionsgruppe, Pufferzone |
| I | Alle Schluckstellen samt Einzugsgebieten werden in den Datenbestand integriert. Je nach Distanz werden Abflussarten zugeordnet: konzentriert (I_p1), halbkonzentriert (I_p2) oder halbdiffus (I_p3). | | Kapitel 4.3.2 Tabelle 3 Abbildung 6 | Feld gruppieren, berechnen |
| I | Die Infiltrationsart wird für das übrige Einzugsgebiet der Fassung/Quelle je nach Oberflächenabfluss als diffus (I_k4) oder halbdiffus (I_k3) eingestuft. | | Kapitel 4.3.3–4.3.5 Tabellen 2 und 3 | Feld berechnen |
| P | Die Punktzahl für P wird als Kombination der Input-Variablen berechnet (Art, Mächtigkeit und Durchlässigkeit der Deckschicht). | | Kapitel 4.4 Tabelle 4 | Feld berechnen |
| E | Die Punktzahl für E wird als Kombination der Input-Variablen berechnet (Bodenart, Mächtigkeit der Deckschicht, Erosion, Verwitterung, Karrenfeld, Doline). | | Kapitel 4.5 Tabelle 5 | Feld berechnen |
| K | Die Punktzahl für K wird als Kombination der Input-Variablen berechnet (ungesättigter Bereich, unterirdischer Bachlauf, gesättigter Bereich oder Markierversuch). | | Kapitel 4.6 Tabelle 6 | Feld berechnen |
| Total Schutzbpunkte | Parameter E, P und I mit K kombinieren, um gesamte Schutzbunktzahl zu ermitteln. | | Kapitel 4.7 Abbildung 9 | Feld berechnen |
| Schutzzzone | Anhand der Gesamtpunktzahl die Vulnerabilität und die Grundwasserschutzzzone zuordnen. | | Kapitel 4.8 Tabelle 7 | Feld berechnen |

A8 Validierung der Vulnerabilität mit Markierversuchen

A8-1 Grundsatz

Die Fließdauer und die Rückgewinnungsrate des Tracers, der an einem gegebenen Punkt eines Fassungseinzugsgebiets in den Boden eingeimpft wird, entspricht per Analogie einem zeitlich und räumlich punktuellen Schadstoffbelastungereignis. Mit einem konservativen Tracer lässt sich so im Prinzip die intrinsische Vulnerabilität des Fließwegs zwischen Impfstelle und Fassung ermitteln. Damit die Markierversuche vergleichbar sind, müssen sie unter ähnlichen Voraussetzungen stattfinden. Darum wird hier ein Standardverfahren vorgegeben.

A8-2 Verfahren

- 1) Infiltrationsfläche generell in der Größenordnung von 25 m^2 bestimmen. Bei starker Hangneigung berücksichtigen, dass der Oberflächenabfluss den Tracer aus dem Versuchsbereich hinausschwemmen könnte;
- 2) den Versuchsbereich mit Beregnungssystemen bewässern (50–100 mm), bis der Boden gesättigt ist und einer Mittel- bis Hochwassersituation entspricht;
- 3) den Tracer zur Impfung mit dem Bewässerungswasser mischen;
- 4) Bewässerung ohne Tracer fortsetzen, bis er vollständig versickert ist; im Allgemeinen sind weitere 50 bis 100 mm erforderlich.

Die Bewässerung sollte nicht zu intensiv sein, um einen zu hohen Oberflächenabfluss zu vermeiden, denn dieser könnte den Tracer aus dem Versuchsbereich hinausschwemmen. Es sind Tracer zu verwenden, die im natürlichen Umfeld kaum absorbiert werden. Diese Voraussetzung erfüllen folgende Fluoreszenz-Tracer am besten: Uranin, Duasyn Yellow, Eosin und Naphtionat. Weil ihre Nachweisgrenze aber äußerst unterschiedlich ist, muss die verwendete Menge entsprechend angepasst werden. So ist für ein vergleichbares Resultat etwa 2-mal mehr Duasyn oder Eosin und ungefähr 10-mal mehr Naphtionat erforderlich als Uranin. Die Rhodamine sind nicht empfehlenswert, weil sie der Boden relativ stark absorbiert.

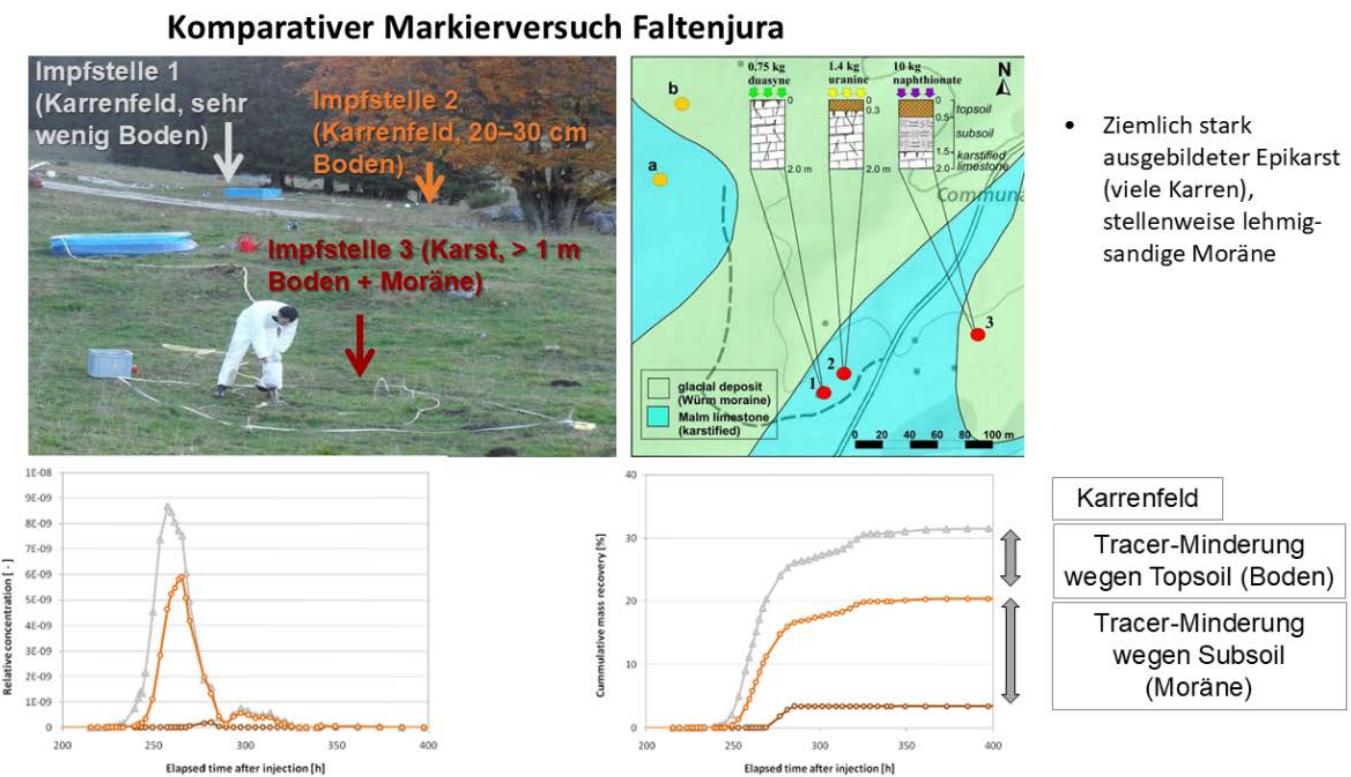
Es wird eine Bewässerungsrate von ~20 mm/h empfohlen. Dies ist ein Kompromiss zwischen einer praktikablen Impfdauer und einem realistischen Regenereignis.

A8-3 Beispiel

Es wurden verschiedene Tests in unterschiedlichen Umgebungen vorgenommen. Abbildung 16 stellt ein Fallbeispiel vor, bei dem drei Tracer in verschiedenen Bodenschichten eingeimpft wurden. Die grossen Unterschiede bei der Rückgewinnungsrate der Tracer verweisen auf eine deutliche Minderung durch den Fliessweg im Boden und im Epikarst.

Abbildung 16

Beispiel eines Standard-Markiererversuchs mit unterschiedlichen Bodenmächtigkeiten (aus Sinreich & Pochon, 2015).



Wichtige Referenz

BWG (2002). Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie. Praxishilfe. Berichte des BWG. Serie Geologie.