

PRAXISHILFE

Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK)

1998



**Bundesamt für Umwelt, Wald und
Landschaft (BUWAL)**

PRAXISHILFE

Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK)

Anwendung bei der Ausscheidung
von Grundwasserschutzzonen

**Herausgegeben vom Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft
Bern, 1998**

Impressum

Autoren

Nathalie Doerfliger
François Zwahlen
Universität Neuenburg, Zentrum für Hydrogeologie (Centre d'hydrogéologie)
Rue Emile-Argand 11
2007 Neuenburg

Expertengruppe

Jean-Pierre Tripet*, Präsident
Landeshydrologie und -geologie
Pierre-Alain Gretillat*
Universität Neuenburg, Zentrum für Hydrogeologie
Daniel Hartmann
BUWAL, Abteilung Gewässerschutz und Fischerei
Benjamin Meylan
BUWAL, Abteilung Gewässerschutz und Fischerei
Christian Schlüchter*
Universität Bern, Geologisches Institut
Gianni della Valle*
WEA, Abteilung Geologie, Bern
Andres Wildberger*
Dr. von Moos AG, Zürich
Jürg Zobrist*
EAWAG, Dübendorf
** Vertreter der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie*

Redaktion, Layout und Realisierung

François Pasquier
Beratender Hydrogeologe
2108 Couvet

Übersetzung (Originalversion auf Französisch)

Roger Rey
Andres Wildberger
Dr. von Moos AG, 8037 Zürich

Titelbild Karstmorphologie (Epikarst). Sieben Hengste, Kt. Bern. (Foto V. Puesch)

Hinweis Es existiert eine französische Version dieser Publikation (Originalsprache)
Bestellnummer :

Bezugsquelle Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Dokumentation
3003 Bern
Fax + 41 (0)31 324 02 16
E-mail : docu@buwal.admin.ch
Internet : <http://www.admin.ch/buwal/publikat/d/>

Bestellnummer VU-2504-D

© BUWAL 1998 6.99 900 9989

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Abstracts (<i>dt., franz., ital., engl.</i>)	4
Vorwort	6
Préface	7
Prefazione	8
Zusammenfassung	9
Résumé étendu	11
1 Einleitung	13
2 Vulnerabilität von Fassungen in Karstgebieten	14
3 Die Multikriterien-Methode (EPIK-Methode)	19
3.1 Ermittlung der vier Kriterien E, P, I und K	20
3.2 Berechnung des Schutzfaktors F	28
3.3 Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen	30
3.4 Anpassung und Verifizierung der Methode	31
4 Zwei Fallstudien als Anwendungsbeispiele	32
4.1 Beispiel des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier	32
4.2 Einzugsgebiet der Blattiquellen in der Lenk/BE	40
4.3 Finanzielle Aspekte	47
5 Folgerungen und Aussichten	48
6 Anhänge	49
1 Karte der Verteilung des Epikarsts (Karstmorphologie) im bernischen Teil des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier	50
2 Karte der Verteilung der schützenden Deckschicht im bernischen Teil des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier	51
3 Karte der Infiltrationsverhältnisse im bernischen Teil des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier	52
4 Karte der Verteilung des Epikarsts (Karstmorphologie) im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattiquellen in Lenk (BE)	53
5 Karte der Verteilung der schützenden Deckschicht im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattiquellen in Lenk (BE)	53
6 Karte der Infiltrationsverhältnisse im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattiquellen in Lenk (BE)	54
7 Karte mit Angabe der Entwicklung des Karströhrennetzes im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattiquellen in Lenk (BE)	54
7 Bibliographie	55

ABSTRACTS

Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK)

EPIK ist eine Multikriterien-Methode zur kartographischen Erfassung der Vulnerabilität in Einzugsgebieten von Karstquellen und Karst-Grundwasserfassungen. Vulnerabilitätskarten bilden die Grundlage für die Ausscheidung der Grundwasserschutzzonen in Karstgebieten.

Die EPIK-Methode trägt der spezifischen Grundwasserdynamik in Karstaquiferen Rechnung. Berücksichtigt werden vier Kriterien: (1) Entwicklung des Epikarsts, (2) Schutzwirkung der Deckschicht (Protection), (3) Infiltrationsverhältnisse und (4) Entwicklung des Karstnetzes.

Für jedes Flächenelement eines Untersuchungsgebietes werden für jedes der vier Kriterien E, P, I und K die zugehörigen Indizes ermittelt und separat auskartiert. Jedes Kriterium ist zudem, in Abhängigkeit seiner Schutzfunktion, mit einem Koeffizienten gewichtet. Die Summe der ermittelten Werte ergibt den Schutzfaktor F für jedes Flächenelement. Aus der räumlichen Verteilung von F resultiert eine Vulnerabilitätskarte, welche manuell oder mittels eines GIS erstellt werden kann. F-Werte können direkt und in nachvollziehbarer Weise zur Ausscheidung der Grundwasserschutzzonen S1, S2 und S3 verwendet werden.

Die EPIK-Methode wurde im Rahmen mehrerer Pilotstudien in verschiedenen Gebieten der Schweiz mit unterschiedlichen Karsttypen - im Zusammenhang mit periodischen Verschmutzungen des Trinkwassers durch die Landwirtschaft - geprüft. Dabei ermöglichten die Vulnerabilitätskarten die Ausscheidung neuer Schutzzonen, die in der Folge durch Markierversuche und geophysikalische Untersuchungen verifiziert wurden.

Stichworte : Grundwasser, Karst, Vulnerabilität, kartographische Aufnahme, Grundwasserschutzzonen, Schweiz, EPIK.

Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK)

La méthode multicritère EPIK a été établie pour cartographier de manière générale la vulnérabilité des aquifères karstiques et plus spécifiquement celle des bassins d'alimentation des sources ou captages en milieu karstique. La carte de vulnérabilité obtenue constitue ainsi une base indispensable pour la délimitation des zones de protection.

Basée sur l'organisation spécifique des écoulements dans les aquifères karstiques, cette méthode prend en compte 4 critères: 1) développement de l'Epikarst, 2) importance de la couverture Protectrice, 3) conditions d'Infiltration et 4) développement du réseau Karstique.

On évalue chaque critère en le qualifiant par des indices, qui sont cartographiés sur l'ensemble du bassin d'alimentation des sources ou captages considérés. A chaque critère indexé, on attribue une valeur en fonction du rôle protecteur qu'il représente. L'addition des valeurs obtenues pour chacun des critères fournit la valeur du facteur de protection F pour chaque élément de surface du bassin d'alimentation étudié. De cette manière on obtient, sous forme d'une carte de vulnérabilité, une représentation de la répartition du facteur F pour l'ensemble du bassin. Cette opération peut se faire manuellement ou à l'aide d'un système d'information géographique. Grâce à une relation d'équivalence, on peut transformer de manière rigoureuse le document obtenu en carte des zones de protection S1, S2 et S3.

Cette méthode a été ajustée sur plusieurs sites en milieu karstique en Suisse (différents types de karst) où se posaient des problèmes de contamination des sources essentiellement dus à l'agriculture. Les cartes de vulnérabilité ont permis d'établir de nouvelles zones de protection, vérifiées à l'aide d'essais de traçage et d'investigations géophysiques.

Mots-clés : Eaux souterraines, karst, vulnérabilité captages, cartographie, zones de protection, Suisse, EPIK.

Cartografia della vulnerabilità in regioni carsiche (EPIK)

Il metodo a più criteri EPIK è stato concepito allo scopo di cartografare in generale la vulnerabilità degli acquiferi carsici e in particolare quella dei bacini di alimentazione delle sorgenti o captazioni in regioni carsiche. La carta della vulnerabilità ottenuta costituisce una base indispensabile alla delimitazione delle zone di protezione.

Tale metodo, basato sull'organizzazione specifica del deflusso negli acquiferi carsici, prende in considerazione quattro criteri: 1) lo sviluppo dell'Epicarso, 2) l'importanza della copertura di Protezione, 3) le condizioni d'Infiltrazione, 4) lo sviluppo della rete carsica (Karst).

Ogni criterio viene valutato in base a una qualificazione per indici che sono cartografati sull'insieme del bacino di alimentazione delle sorgenti o captazioni considerate. A ogni criterio indicizzato viene attribuito un valore in funzione del ruolo di protezione che esso rappresenta. L'addizione dei valori ottenuti per ciascun criterio fornisce il valore del fattore di protezione F per ciascun elemento della superficie del bacino di alimentazione studiato. In questo modo si ottiene, sotto forma di una carta della vulnerabilità, una rappresentazione della ripartizione del fattore F per l'insieme del bacino. Tale operazione può essere svolta manualmente o con l'aiuto di un sistema d'informazione geografica. Grazie a una relazione di equivalenza è possibile trasformare in modo rigoroso il documento ottenuto in carte delle zone di protezione S1, S2, S3.

Detto metodo è stato adattato su diversi siti carsici in Svizzera (tipi differenti di carso) in cui vi erano problemi di inquinamento delle sorgenti dovuti essenzialmente all'agricoltura. Le carte di vulnerabilità hanno permesso di stabilire nuove zone di protezione che sono state valutate per mezzo di prove con traccianti e di analisi geofisiche.

Parole chiave : acque sotterranee, carso, vulnerabilità delle captazioni, cartografia, zone di protezione, Svizzera, EPIK.

Vulnerability mapping in karst areas (EPIK)

EPIK is a multiparameter method that was developed as an aid in mapping groundwater vulnerability in karst regions, with special respect to catchment areas of sources. Groundwater vulnerability maps based on this method are an indispensable tool for establishing groundwater protection zones.

EPIK is based on the specific groundwater dynamics in karst aquifers. Four parameters are taken into account: (1) Development of the Epikarst, (2) effectiveness of the Protective cover, (3) conditions of Infiltration and (4) development of the Karst network.

After having been given a quality-ranking index, each of the four parameters is mapped throughout the groundwater catchment area. A weighting coefficient is then attributed to each of the indexed parameters according to their degree of protection against contamination. By adding the protection values of each parameter a protection factor F for each surface element of the catchment area is calculated. In this way a groundwater vulnerability map is produced, representing the spatial distribution of F. F may be determined manually or by means of a GIS. Furthermore, F values can be used to establish the groundwater protection zones S1, S2 and S3 in an objective manner.

The EPIK method was adjusted in several pilot studies in different types of karst in Switzerland where groundwater is polluted mainly by agricultural activities. The groundwater vulnerability maps allowed the establishment of new protection zones, which were subsequently verified by tracer tests and geophysical investigations.

Key words : Groundwater, karst hydrology, vulnerability, mapping, source protection zones, Switzerland, EPIK.

VORWORT

Zum Schutz der im öffentlichen Interesse liegenden Trinkwasserfassungen vor Verschmutzungen verlangt das Gewässerschutzgesetz die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen. Die Dimensionierung dieser Schutzzonen beruht in Lockergesteins-Grundwasserleitern auf einer bestimmten Fliesszeit, welche das Grundwasser braucht, um zur Fassung zu gelangen. Die Bestimmung dieser Fliesszeit - und damit auch die Bemessung der Grundwasserschutzzonen - erfolgt in der Regel aufgrund eindeutiger Resultate einer hydrogeologischen Untersuchung.

In Karst-Grundwasservorkommen sind die Fliessgeschwindigkeiten des Grundwassers sehr heterogen, sodass die Gefahr einer Verschmutzung des gefassten Wassers nicht generell mit zunehmender Entfernung des Gefahrenherdes abnimmt, wie dies bei Lockergesteins-Grundwasser normalerweise der Fall ist. Zudem wird die Fliessgeschwindigkeit des Karst-Grundwassers von den meteorologischen Verhältnissen beeinflusst. Das Kriterium der Grundwasserfliesszeit ist demnach für die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen in Karst-Grundwassergebieten grundsätzlich ungeeignet.

Mit der vorliegenden Publikation - welche sich an Fachbehörden, beratende Geologen und Ingenieure sowie an Fachkreise in der Forschung wendet - wird dem Bedürfnis nachgekommen, die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen in Karstgebieten auf eine hydrogeologisch fundierte Basis zu stellen. Es wird eine Methode zur Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen vorgestellt, die nicht auf der Bestimmung von Grundwasserfliessgeschwindigkeiten, sondern auf der Beurteilung verschiedener hydrogeologischer Kriterien beruht, die den Schutz des Grundwassers für die verschiedenen Teilgebiete des Einzugsgebiets einer Fassung kennzeichnen. Die Grundwasserschutzzonen werden also aufgrund der Vulnerabilität (Empfindlichkeit in Bezug auf eine Verschmutzung des Trinkwassers) ausgeschieden.

Diese Methode wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und der Landeshydrologie und -geologie (LHG) durch das "Centre d'hydrogéologie" an der Universität von Neuenburg entwickelt. Eine Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitgliedern der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie, in Zusammenarbeit mit der Abteilung Gewässerschutz und Fischerei des BUWAL und der LHG, begleitete das Projekt.

PRÉFACE

Dans le but d'assurer la qualité des eaux potables du pays, la loi sur la protection des eaux exige que des zones de protection des eaux souterraines soient délimitées autour des captages d'intérêt public. Pour les aquifères à porosité d'interstice, le dimensionnement de ces zones de protection est basé sur la distance parcourue par l'eau, pendant une durée déterminée, avant d'arriver au captage. La détermination de cette distance, et donc le dimensionnement des zones de protection, sont généralement effectués sur la base de mesures spécifiques réalisées dans le cadre d'une étude hydrogéologique.

Dans les aquifères karstiques, la répartition des vitesses de circulation des eaux souterraines est très hétérogène, de sorte que le risque de pollution de l'eau captée ne diminue pas régulièrement avec l'éloignement du captage, comme c'est généralement le cas pour les aquifères à porosité d'interstice. De plus, les vitesses de circulation des eaux souterraines karstiques sont très variables en fonction des conditions atmosphériques. Le critère temps utilisé pour la délimitation des zones de protection dans les aquifères à porosité d'interstice n'est donc pas applicable aux aquifères karstiques.

Avec la présente publication, on a voulu jeter les bases d'une délimitation hydrogéologiquement fondée des zones de protection dans les régions karstiques. La méthode proposée n'est pas basée sur la détermination des vitesses de circulation des eaux souterraines, mais sur l'évaluation d'un certain nombre de critères hydrogéologiques caractérisant le degré de protection des eaux souterraines dans les différentes parties du bassin d'alimentation d'un captage. Les zones de protection sont par conséquent délimitées sur la base de leur sensibilité à la pollution des eaux souterraines, autrement dit, de la vulnérabilité des eaux souterraines.

Cette méthode a été développée par le Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel dans le cadre d'un mandat de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEP) et du Service hydrologique et géologique national (SHGN). Un groupe de travail composé de membres de la Société suisse d'hydrogéologie a été chargé d'accompagner le projet, en collaboration avec la division Protection des eaux et pêche de l'OFEP et avec le SHGN.

Cette publication s'adresse aux autorités, aux géologues et ingénieurs conseils, ainsi qu'aux spécialistes de la recherche.

PREFAZIONE

Al fine di proteggere l'acqua potabile dall'inquinamento, la legge sulla protezione delle acque prevede per le captazioni di interesse pubblico, la delimitazione di zone di protezione delle acque sotterranee. Le dimensioni di tali zone di protezione sono basate, per acquiferi di roccia sciolta, su un determinato tempo di scorrimento delle acque sotterranee per raggiungere la captazione. La determinazione di questo tempo di scorrimento - e quindi anche delle zone di protezione delle acque sotterranee - avviene in linea di principio sulla base di risultati inequivocabili di un'indagine idrogeologica.

Nelle acque sotterranee dei terreni carsici, i tempi di scorrimento delle acque sono molto eterogenei, tanto che il pericolo di un inquinamento delle acque captate, non diminuisce di norma con l'aumento della distanza della fonte di pericolo, com'è il caso per una falda in roccia sciolta. Inoltre, il tempo di scorrimento delle acque sotterranee nei terreni carsici viene influenzato dalle condizioni meteorologiche. Pertanto, il criterio del tempo di scorrimento delle acque sotterranee, è fondamentalmente inadeguato per la delimitazione di zone di protezione delle acque sotterranee in terreni carsici.

Con la presente pubblicazione - destinata alle autorità competenti, ai geologi e agli ingegneri consulenti, nonché ai ricercatori interessati - si viene incontro all'esigenza di basare la delimitazione delle zone di protezione delle acque sotterranee in terreni carsici su criteri idrogeologici. Viene presentato un metodo di delimitazione delle zone di protezione delle acque sotterranee nei terreni carsici che non è basato sulla determinazione dei tempi di scorrimento, ma sulla valutazione di vari criteri idrogeologici che caratterizzano la protezione delle acque sotterranee dei diversi settori del bacino imbrifero di una captazione. Le zone di protezione delle acque sotterranee vengono dunque delimitate sulla base della vulnerabilità riguardo all'inquinamento dell'acqua potabile.

Questo metodo è stato elaborato dal Centre d'hydrogéologie dell'Università di Neuchâtel su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio (UFARP) e del Servizio idrologico e geologico nazionale (SIGN). Un gruppo ad hoc composto da membri della Società svizzera di idrogeologia, in collaborazione con la Divisione protezione delle acque e pesca dell'UFARP e del SIGN ha seguito i lavori.

ZUSAMMENFASSUNG

Wasser aus Karst-Grundwasservorkommen bildet in zahlreichen Regionen der Schweiz eine wichtige Ressource für die Trinkwasserversorgung. Die in diesen Gebieten aufgrund von Artikel 20 des Gewässerschutzgesetzes (SR 814.20) ausgeschiedenen Grundwasserschutzzonen weisen mangels hydrogeologischer Grundlagen oftmals nur eine beschränkte Schutzwirkung auf, sodass Trinkwasserverschmutzungen in Karstgebieten keine Seltenheit darstellen. Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) in Zusammenarbeit mit der Landeshydrologie und -geologie (LHG) hat deshalb nach einem neuen Ansatz für die Ausscheidung von Schutzzonen im Karstmilieu gesucht. Dabei sollten die neusten Erkenntnisse über die hydraulischen Verhältnisse in Karstaquiferen berücksichtigt werden und die Ausscheidung der Schutzzonen auf nachvollziehbaren Kriterien beruhen. Mit solchen Schutzzonen kann, zum Schutz der Grundwasser-Ressourcen, gezielt auf die Bodennutzung Einfluss genommen werden.

Die sog. EPIK-Methode, welche am "Centre d'hydrogéologie" der Universität von Neuchâtel entwickelt wurde, basiert auf der Abschätzung und der kartographischen Erfassung der Vulnerabilität (Empfindlichkeit in Bezug auf eine Verschmutzung des Trinkwassers) im Einzugsgebiet von Fassungen. Die Vulnerabilität wird dabei als eine den Aquiferen immanente Eigenschaft definiert, welche ein Mass für die Sensibilität eines Grundwasserleiters auf natürliche und anthropogene Einflüsse darstellt. Die Methode basiert auf geologischen, geomorphologischen und hydrogeologischen Kriterien und ist unabhängig von der momentanen resp. künftigen Nutzung des Bodens sowie von wirtschaftlichen Überlegungen.

Die EPIK-Methode berücksichtigt im jeweiligen Einzugsgebiet einer Quelle oder einer Fassung die vier folgenden, objektiven Kriterien: Ausbildung des Epikarsts ("E"; oberflächennaher, stark verkarsteter Bereich des Kalkuntergrundes, der eine stark erhöhte Wasserdurchlässigkeit aufweist), Schutz (Protektion) durch die Deckschicht ("P"), Infiltrationsverhältnisse ("I"; diffuse resp. konzentrierte Infiltration) und Entwicklung des Karstnetzes ("K"). Diese vier Kriterien sind notwendig und ausreichend für die Ermittlung der Vulnerabilität.

Nach der Bestimmung des Einzugsgebietes der zu schützenden Quelle resp. der Fassung wird in drei Schritten vorgegangen:

- a) Ermittlung der Indizes der vier erwähnten Kriterien und deren separate Auskartierung;
- b) Berechnung des Schutzfaktors für jede Teilfläche des Einzugsgebietes, indem die ermittelten Indizes der vier Kriterien verknüpft und gewichtet werden;
- c) kartographische Darstellung der Verteilung des Schutzfaktors für das gesamte Einzugsgebiet; dank der klaren Beziehung zwischen diesem Faktor und den Schutzzonen erlaubt die Karte die Ausscheidung der Grundwasserschutzzonen S1, S2 und S3 auf eine nachvollziehbare Weise.

Die Methode wurde, im Zusammenhang mit periodischen Verschmutzungen von Trinkwasser durch die Landwirtschaft, in mehreren Gebieten der Schweiz mit unterschiedlichen Karsttypen (St-Imier, Bure, St-Gingolph und Lenk) getestet und angepasst. Die Anwendung der Methode in zwei dieser Testgebiete - das eine liegt im Faltenjura, das andere im Helvetikum - wird in diesem Bericht dargelegt. Die Anwendungsbeispiele zeigen die Durchführbarkeit des neuen Ansatzes. Verunreinigungen von Karstgrundwasserleitern sind nicht schicksalhaft. Die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen, welche den hydrogeologischen Eigenschaften des Karsts Rechnung tragen, in Verbin-

dung mit den entsprechenden Schutzmassnahmen, können das Risiko einer Verschmutzung stark reduzieren. Die auf spezifischen hydrogeologischen Kriterien beruhende EPIK-Methode erlaubt in Zukunft einen besseren Schutz von Quellen und Fassungen in Karstgebieten. Das BUWAL hat die Resultate dieser Studie in der neuen Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (SR 814.201) berücksichtigt.

RÉSUMÉ ÉTENDU

Les eaux souterraines provenant des aquifères karstiques jouent, pour de larges régions de Suisse, un rôle décisif dans l'approvisionnement en eau potable. Afin de faciliter l'application de la loi fédérale sur la protection des eaux de 1991 (RS 814.20), des études destinées à améliorer la protection des eaux souterraines dans les régions karstiques ont été réalisées. On constate, entre autres, que les zones de protection établies en régions karstiques manquent, fréquemment, de fondement hydrogéologique et, pour cette raison, montrent souvent une efficacité limitée. Dans ces conditions, il n'est pas rare que des pollutions se produisent. Pour remédier à cette situation, l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), en collaboration avec le Service hydrologique et géologique national, a cherché une nouvelle approche de la délimitation des zones de protection dans les régions karstiques, qui tienne compte des connaissances les plus récentes relatives au modèle conceptuel de l'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères karstiques, et qui conduise à des zones de protection fondées au point de vue hydrogéologique et établies selon des critères rigoureux. De telles zones de protection sont alors à même de satisfaire aux buts d'une stratégie de protection des eaux souterraines agissant sur l'utilisation du territoire.

Ainsi, une nouvelle méthode, appelée "EPIK", a été développée par le Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Elle est basée sur l'évaluation et le lever cartographique de la vulnérabilité du bassin d'alimentation des captages. La vulnérabilité est définie, ici, comme une propriété intrinsèque des aquifères, qui exprime la sensibilité de ces derniers aux impacts naturels et anthropogènes. La méthode se veut rigoureuse; elle est basée sur des critères géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques. De plus, elle est indépendante de l'occupation du sol actuelle ou future et des considérations économiques.

La méthode EPIK est une méthode multicritère à indices. Elle repose sur une carte de la vulnérabilité du bassin d'alimentation d'une source ou d'un puits de captage donné, qui prend en compte les quatre critères objectifs suivants: développement de l'épikarst ("E", un domaine du sous-sol voisin de la surface du terrain, intensément karstifié et de perméabilité très élevée), propriétés de la couverture protectrice ("P"), conditions d'infiltration ("I", infiltration diffuse ou ponctuelle) et développement du réseau karstique ("K"). Ces critères sont nécessaires et suffisants pour définir la vulnérabilité.

Après la délimitation du bassin d'alimentation de la source ou du captage étudié, la méthode se déroule en trois étapes:

- a) évaluation semi-quantitative et lever cartographique de chacun des quatre critères mentionnés;
- b) calcul de la valeur d'un "facteur de protection", par combinaison et pondération de la valeur des quatre critères, pour chaque surface unitaire du bassin d'alimentation;
- c) représentation cartographique de la répartition du facteur de protection pour l'ensemble du bassin d'alimentation; grâce à une relation d'équivalence entre ce facteur et les zones de protection, la carte obtenue permet de délimiter de manière rigoureuse les zones définies par la législation suisse en matière de protection des eaux (S1, S2 et S3).

La méthode EPIK a fait l'objet de tests et d'ajustements sur plusieurs sites en Suisse (St-Imier, Bure, St-Gingolph et La Lenk), dans différents contextes géologiques, où des problèmes de contamination des sources dus à l'agriculture se posent régulièrement. L'utilisation de la méthode dans le cas de deux de ces zones tests, dans le Jura plissé et

dans les Alpes helvétiques, est présentée dans ce rapport. Les exemples d'application ont démontré la faisabilité et l'intérêt de cette nouvelle approche. La contamination des aquifères karstiques n'est pas une fatalité. Des zones de protection délimitées en adéquation avec le fonctionnement hydrogéologique du karst, combinées avec leurs mesures de protection respectives, peuvent à l'évidence réduire considérablement les risques de pollution. La méthode EPIK, basée sur des critères hydrogéologiques spécifiques, doit permettre une meilleure protection des sources et captages en milieu karstique. L'OFEFP a tenu compte du résultat de ces études dans la nouvelle ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (RS 814.201).

1 EINLEITUNG

Wasser aus *Karstgrundwasservorkommen* hat für die Wasserversorgung zahlreicher Regionen der Schweiz, wie zum Beispiel dem Jura, den nördlichen Alpen und einzelnen Regionen im Südosten des Landes (austroalpiner Bereich), eine grosse Bedeutung. Diese Regionen werden land- und forstwirtschaftlich stark genutzt, zudem spielen Industrie und Tourismus für die wirtschaftliche Entwicklung dieser Regionen häufig eine wichtige Rolle. Das Karstgrundwasser in der Schweiz kann im allgemeinen durch eine einfache Aufbereitung (Flokulation, Sedimentation, Filtration, Desinfektion) als Trinkwasser genutzt werden. Infolge von Hochwasserereignissen kommt es jedoch immer wieder zu Trübungen und zu Verschmutzungen durch organische Stoffe. Grundwasservorkommen in Karstgebieten sind demnach anfällig auf anthropogene Einflüsse und können daher in der Regel als vulnerabel (empfindlich gegenüber Verschmutzung) bezeichnet werden.

Diese *Vulnerabilität* lässt sich insbesondere mit der sehr heterogenen Struktur der Karstgrundwasserleiter erklären: Einerseits eine diffuse oder konzentrierte Versickerung von Oberflächenwasser und andererseits eine sehr hohe Durchlässigkeit in den Karströhren, welche in wenig durchlässigem Karbonatgestein verlaufen. Diese "doppelte Dualität" äussert sich in einem ganz charakteristischen hydrodynamischen Verhalten: So wirken sich starke Regenereignisse in Zonen, wo das Meteorwasser konzentriert infiltriert und mehr oder weniger direkt in das Karströhrensystem gelangt, rasch und heftig aus, so dass Filtrations- oder Selbstreinigungsprozesse nicht wirksam werden können. Wo das Wasser allerdings diffus versickert und sich langsam durch das wenig durchlässige Karbonatgestein bewegt, kann mit Filtrations- oder Selbstreinigungsprozessen gerechnet werden. Auf Grund dieser spezifischen Eigenschaften verlangt die Ausscheidung von Grundwasserschutz zonen in Karstgrundwassergebieten eine besondere Vorgehensweise.

Das *Bundesgesetz* über den Schutz der Gewässer - Gewässerschutzgesetz, GSchG, vom 24. Januar 1991 (SR 814.20) - fordert in Artikel 20 die Ausscheidung von Grundwasserschutz zonen für Grundwasserfassungen, welche im öffentlichem Interesse liegen, wobei der Vollzug den einzelnen Kantonen obliegt. Innerhalb dieser Schutz zonen gelten Nutzungsbeschränkungen: So sind beispielsweise gewerbliche und industrielle Bauten, von denen eine Gefahr für das Grundwasser ausgeht, nicht zugelassen; zudem ist der Abbau von Material verboten (Art. 44 GSchG). Die Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV, SR 814.201) unterscheidet den Fassungs bereich (Zone S1), die engere Schutzzone (Zone S2) und die weitere Schutzzone (Zone S3).

Grundwasserschutz zonen

Die Zone S1 soll verhindern, dass bei Fassungsanlagen Schäden entstehen und dass diese Anlagen und deren unmittelbare Umgebung verunreinigt werden.

Die Zone S2 soll gewährleisten, dass Kerne und Viren von der Fassung ferngehalten werden. Sie soll zudem verhindern, dass die Fassung durch Grabungen und unterirdische Arbeiten verunreinigt wird und dass unterirdische Bauten den Grundwasserfluss zur Fassung beeinträchtigen.

Die Zone S3 soll gewährleisten, dass bei unmittelbar drohenden Gefahren, wie beispielsweise bei Unfällen mit wassergefährdenden Stoffen, genügend Zeit und Raum für Sanierungsmassnahmen zur Verfügung stehen.

Mit der Ausscheidung von Grundwasserschutz zonen sollen die im obenstehenden Kasten aufgelisteten Ziele erreicht werden.

Bei den auf traditionelle Weise ausgeschiedenen **Grundwasserschutzzonen** in Karstgebieten fehlen häufig die hydrogeologischen Grundlagen, wobei insbesondere keine objektiven Kriterien für die Abgrenzung der Zonen S2 und S3 bestehen. Aus diesem Grund ist die Schutzwirkung bei solchen Zonen oftmals ungenügend. Seit dem Erscheinen der "Wegleitung zur Ausscheidung von Gewässerschutzbereichen, Grundwasserschutzzonen und Grundwasserschutzzonen" (BUS, Oktober 1977, teilrevidierte Auflage 1982) wurden die Kenntnisse der hydraulischen Verhältnisse im Karst bedeutend erweitert. Dabei wurde klar, dass für die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen in Karstgebieten ein besonderes Vorgehen notwendig ist. Um dieser Tatsache gerecht zu werden, wurde ein neuer, die Wirksamkeit der Schutzmassnahmen verbessernder Ansatz entwickelt. Die kartographische Methode zur Erfassung der Vulnerabilität von Grundwasservorkommen in Karstgebieten, welche sich auf verschiedene, spezifische Kriterien des hydrodynamischen Verhaltens des Systems stützt, entspricht dieser Zielsetzung. Diese Methode basiert auf geologischen, geomorphologischen und hydrogeologischen Kriterien und ist unabhängig von der momentanen resp. zukünftigen Nutzung des Bodens sowie von wirtschaftlichen Überlegungen. In gewissen Fällen, namentlich bei Vorhandensein von nicht verkarsteten Teileinzugsgebieten und in städtischen Räumen, ist die Methode mit der nötigen Differenzierung anzuwenden.

2 VULNERABILITÄT VON FASSUNGEN IN KARSTGEBIETEN

Eigenschaften von Karstaquiferen

Die Grundwasserleiter in Karstgebieten werden durch geomorphologische und spezifische hydraulische Besonderheiten charakterisiert, wie beispielsweise das Fehlen eines Oberflächenentwässerungsnetzes, die Existenz von bedeutenden Quellaustritten und Schluckstellen oder eines Karströhrennetzes, welches durch Lösungsprozesse im Karbonatgestein entstanden ist, sowie typische Hydrogramme der Quellen in Form einer raschen und starken Zunahme bei Hochwasserereignissen resp. raschen Abnahme der Schüttungsmenge danach, einer langsamen Abnahme in Trockenzeiten und Änderungen des Quellwasserchemismus in Abhängigkeit der Abflussmenge.

Ausgehend von diesen allgemeinen Eigenschaften kann ein **Karstgrundwasserleiter** charakterisiert werden als ein *zusammenhängendes Netz von Karströhren (Karstnetz), welches über Sammelröhren zerklüftete und i.a. gering durchlässige Gesteinsmassen grossräumig entwässert resp. speist* (Jeannin et al. 1993).

Wasserbilanzen im Karst des Jura zeigen, dass zwischen 50 und 75 % des wirksamen Anteils der Niederschläge konzentriert in das **Karströhrensystem** infiltrieren und die restlichen 50 bis 25 % in das mehr oder weniger klüftige Karbonatgestein (sogenannte **gering durchlässige Blöcke**) versickern. Letztere stellen die Schüttung der Quellen in

Vulnerabilität

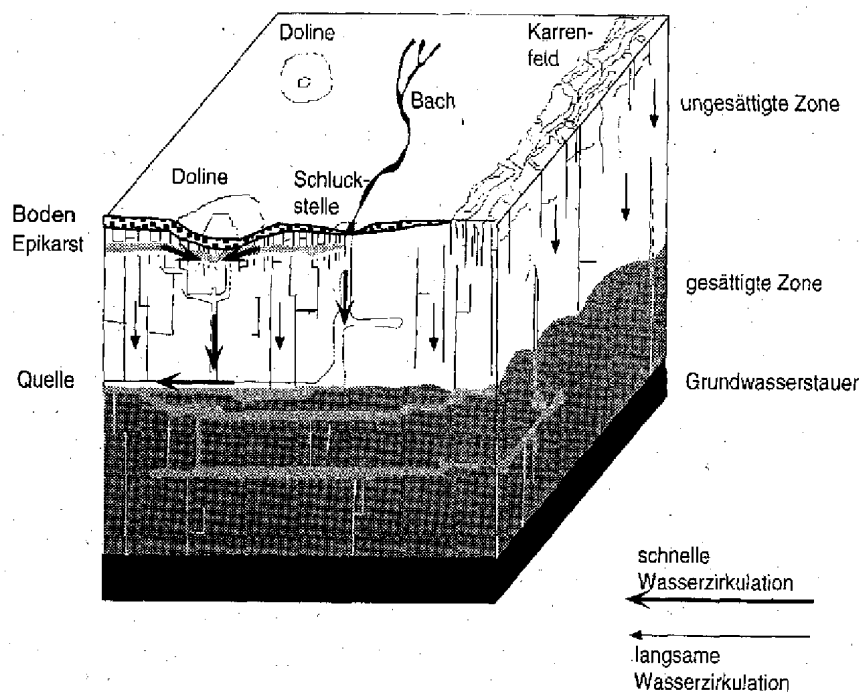
Der Begriff der Vulnerabilität wird in der vorliegenden Studie wie folgt definiert: Die Vulnerabilität ist eine den Aquiferen immanente Eigenschaft, welche deren Beeinflussbarkeit durch natürliche Ereignisse und anthropogene Tätigkeiten widerspiegelt (Gilbrich & Zaporozec 1994). Es handelt sich dabei um eine Eigenschaft, welche mit Hilfe von geologischen und hydrogeologischen Kenntnissen die Charakterisierung der Sensibilität eines Grundwasserleiters auf punktielle oder diffuse Verunreinigungen erlaubt. Die Quellen von Verunreinigungen wie beispielsweise Deponien, Tankanlagen, Unfälle mit wassergefährdenden Flüssigkeiten, natürliche und künstliche Düngemittel, werden auf diese Weise gesamthaft in die Betrachtungen einbezogen.

Trockenperioden sicher (Jeannin & Grasso 1995). Die **konzentrierten Infiltrationen** erfolgen an Versickerungsstellen, welche direkt oder via **Epikarst** mit dem Karstnetz verbunden sind.

Als **Epikarst** wird der durch Auflockerung und Lösungsvorgänge geprägte, stark klüftige Oberflächenbereich einer Kalkformation bezeichnet (Dodge 1982). Diese oberflächennahe Zone des Karstes verläuft nicht kontinuierlich. Sie kann Mächtigkeiten von einigen Dezimetern bis einigen Metern erreichen und kann schwebende Grundwasservorkommen enthalten, welche das infiltrierte Wasser rasch sammeln und ins Karstnetz leiten (Mangin 1975).

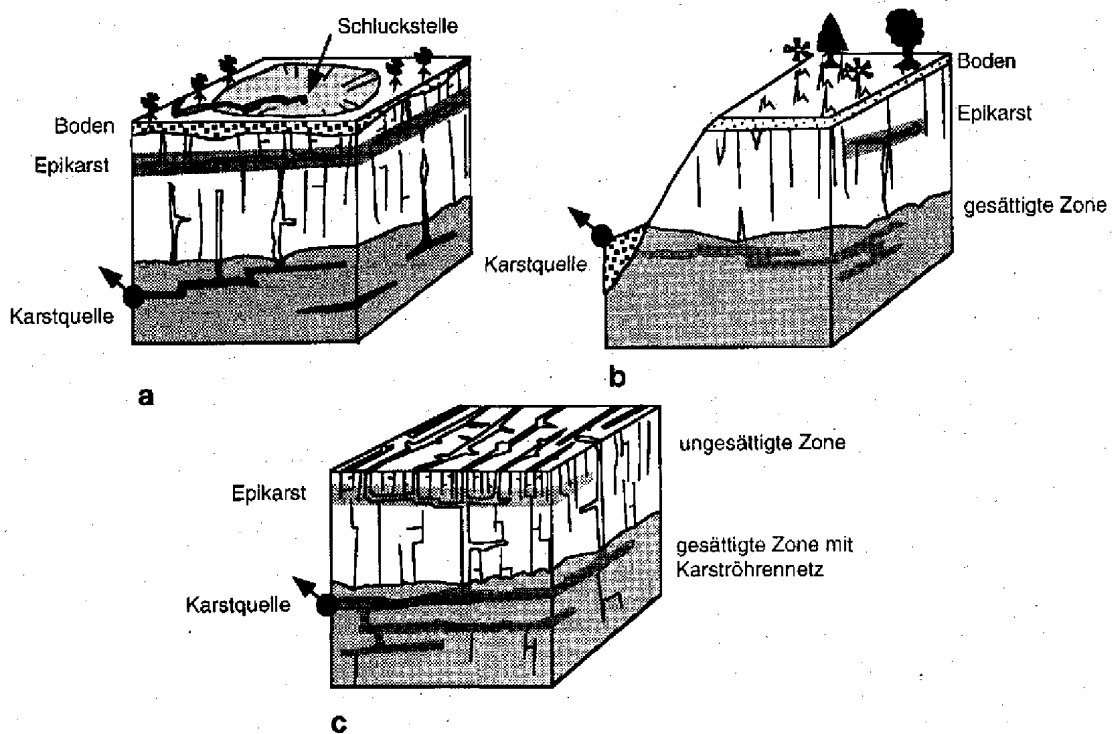
Karstaquifere und Vulnerabilität

Der schematischen Darstellung des Karstgrundwasserleiters in **Figur 1** liegt ein Modell zu Grunde, welches das hydrodynamische Verhalten und die Transportprozesse gleichermaßen berücksichtigt. Bei der Definition der Vulnerabilität wird von dieser Darstellung ausgegangen. In Trockenperioden stammt das Wasser der Karstquellen hauptsächlich aus den gering durchlässigen Blöcken, welche durch die Karströhren drainiert werden. Dieses Wasser besitzt eine beträchtliche Verweilzeit. Nach Starkniederschlägen gelangt mehr als die Hälfte des infiltrierenden Wassers unmittelbar in die Karströhren und fließt von dort rasch zur Quelle. Filtrationsprozesse finden demnach praktisch keine statt, dafür werden mögliche Verunreinigungen generell verdünnt. Die Vulnerabilität eines Karstgrundwasserleiters hängt also ab von den Infiltrationsverhältnissen (Randeinflüsse) sowie der räumlichen Verteilung der Durchlässigkeit und des Speicherkoeffizienten (Verteilung der physikalischen Eigenschaften), welche eine sehr wichtige Rolle bei den Fließ- und Transportprozessen spielen.



Figur 1. Schematische Darstellung eines Karstaquifers.

Die räumliche Verteilung der physikalischen Parameter des Grundwasserleiters und ihre Auswirkung auf die Vulnerabilität von Karstwasserfassungen sind mit zwei ausschlaggebenden Kriterien verknüpft: dem *Karstnetz* und dem *Epikarst*. Entsprechend der zahlreichen möglichen Verästelungen hat das Karstnetz innerhalb des dreidimensionalen Karstgrundwasserleiters eine komplexe Geometrie. Je nach der geologischen, hydrologischen, chemischen, physikalischen und biologischen Vorgeschichte kann das Netz unterschiedlich gut entwickelt sein und die einzelnen Karströhren können in unterschiedlichem Masse untereinander verbunden sein.



Figur 2a,b,c. Beispiele von Kriterienkombinationen, welche für die Vulnerabilität eines Karstaquifers ausschlaggebend sind.

Fassungen resp. Quellen in einem Karstgebiet sind prinzipiell sehr vulnerabel, wenn das Karstnetz und der Epikarst gut entwickelt und untereinander direkt verbunden sind (*Figur 2c*). Wenn der Epikarst nicht direkt mit dem Karstnetz verbunden ist, sind die Fassungen und Quellen weniger vulnerabel. Eine noch kleinere Vulnerabilität besteht schliesslich in der Regel für Fassungen, bei welchen der Aquifer weder ein Karstnetz noch einen Epikarst aufweist (in diesem Fall handelt es sich um einen Kluftgrundwasserleiter). Somit wird klar, dass die Ausscheidung von Schutzzonen in Karstgebieten nicht auf einem einzigen Kriterium beruhen darf. Im Gegenteil, die Benutzung einer *Multikriterienmethode*, welche die spezifischen Eigenschaften des Karstes einbezieht, ist für den Schutz von Karstwasserfassungen unerlässlich.

Rolle der Deckschicht und der Infiltrationsverhältnisse

Die *Deckschicht* eines Grundwasserleiters ist einer der natürlichen Faktoren, welcher bei der Kartierung der Vulnerabilität berücksichtigt wird. Diese Schicht wirkt sozusagen als Dämpfungszone (Zapozec 1985), deren Wirkung von der Mächtigkeit, der Textur / Struktur, dem Gehalt an organischem Material sowie an Tonmineralen, der Kationenaustauschkapazität, dem Wassergehalt und der Wasserdurchlässigkeit abhängt.

Die Art und Weise, wie ein Grundwasserleiter gespeist wird, hängt von den *Infiltrationsverhältnissen* ab. Die Speisung kann diffus, konzentriert oder auf eine intermediäre Weise erfolgen. Im letzteren Fall werden die Infiltrationsverhältnisse bestimmt durch die Eigenschaften der Sickerfläche (Gefälle, Sickerkoeffizient) und die Existenz von bevorzugten Infiltrationszonen.

Was den Einfluss der Infiltration auf die Vulnerabilität von Wasserfassungen in Karstgebieten betrifft, lassen sich drei Fälle unterscheiden:

a) *Konzentrierte Infiltration von Niederschlägen an Schluckstellen von Wasserläufen (Ponore)*: die konzentrierte Infiltration von flächig abfließendem und sich in Wasserläufen sammelndem Meteorwasser stellt eine Stelle mit stark erhöhter Vulnerabilität dar; dasselbe gilt für das lokale Einzugsgebiet solcher Schluckstellen (*Figur 2a*).

b) *Infiltration über eine Lockergesteinsbedeckung (bedeckter Karst)*: die Vulnerabilität solcher Zonen hängt hauptsächlich von der Durchlässigkeit und der Mächtigkeit der Deckschicht, d.h. von deren Filtrationsvermögen, ab (*Figur 2b*). Zu bemerken ist, dass sich die Durchlässigkeit mit dem Wassersättigungsgrad ändert.

c) *Versickerung von Niederschlägen auf eine ganze Fläche verteilt (nackter Karst)*: die Vulnerabilität hängt weitgehend von der Zeit ab, welche das Wasser benötigt, um via Epikarst oder gering durchlässige Blöcke das Karstnetz zu erreichen (*Figur 2c*).

Eigenschaften des Epikarsts

Als Epikarst werden die obersten paar Meter des Kalkuntergrundes bezeichnet, wo die Klüfte in Folge Entlastung geöffnet und durch Lösungsvorgänge erweitert sind. In dieser Zone finden in erhöhtem Masse Verwitterungsvorgänge statt (Dodge 1982). Die Mächtigkeit des Epikarsts beträgt im allgemeinen etwa 0.5 bis 2 Meter (Bonacci 1987), kann

aber auch 5 bis 10 Meter erreichen (*Figur 3*; Doerfliger 1996a). Der Epikarst stellt ein temporärer, schwebender Grundwasserleiter dar (Mangin 1975); das gespeicherte Wasser wird entweder über Klüfte oder über vertikale Röhren an die Basis des Epikarsts, welche durch einen markanten Kontrast der Durchlässigkeit gekennzeichnet ist, abgeleitet (Ford & Williams 1989; Klimchouk 1995). Der Wasserfluss in dieser Zone besitzt eine bedeutende horizontale Komponente (Wasserabfluss entlang von Klüften in Richtung von vertikalen Röhren) und eine etwas weniger bedeutende, vertikale Komponente, welche sich aus dem langsamen Wegsickern in den Klüften

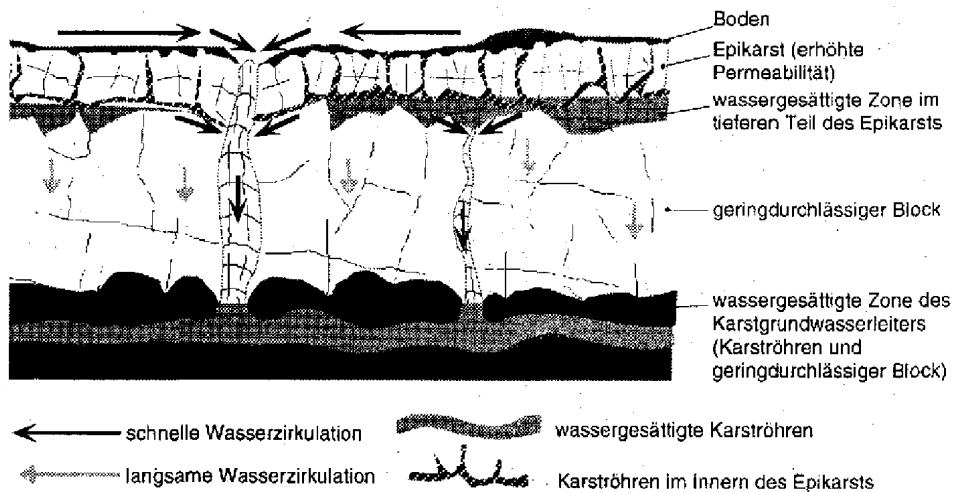


| 2 m |

Figur 3. Aufschluss von Kalken des Portlandien im Steinbruch von Les Breuleux (Untergrenze des Epikarsts nicht sichtbar). (Foto N. Doerfliger)

und dem Abfluss über Röhren ergibt (*Figur 4*).

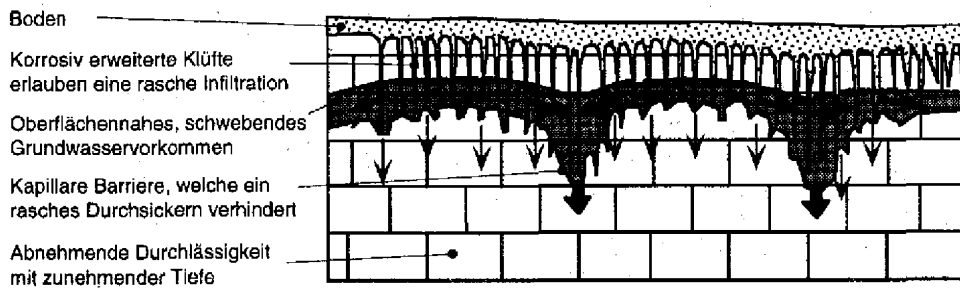
Der Epikarst kommt in bedeckten und unbedeckten Karstgebieten vor und verläuft in seiner lateralen Ausdehnung nicht unbedingt kontinuierlich. Ausgehend von den Hypothesen zur Entstehung von Lösungsdolinen (z.B. Williams 1983) kann geschlossen werden, dass Epikarst auch bei fehlenden morphologischen Anzeichen unter einer Bodenschicht existieren kann (*Figur 5*).



Figur 4. Schematische Darstellung der Fließverhältnisse im Epikarst (Jeannin 1996, nach Smart & Friedrich 1986).

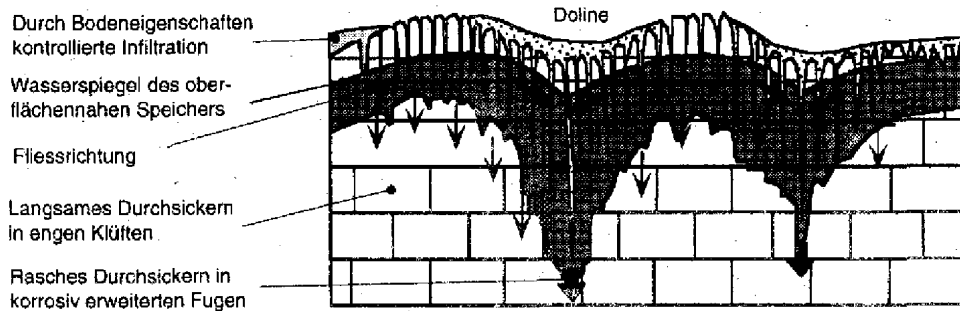
Angaben über das Milieu

(A) bodenbedeckter Karst



Angaben über den Wasserfluss

(B) nackter Karst



Figur 5. Wasserspeicherung im Epikarst, seitliches Wegfliessen des Wassers in Richtung gut durchlässiger Zonen und Entwicklung einer Lösungsdoline (Williams 1983).

3 DIE MULTIKRITERIEN-METHODE (EPIK-METHODE)

Prinzip und Verfahren

Die EPIK-Methode zur Evaluation der Vulnerabilität von Grundwasser im Karstmilieu beruht auf vier Kriterien: (1) der Ausbildung des Epikarsts, (2) der Schutzwirkung durch die Deckschicht (Protektion), (3) den Infiltrationsverhältnissen und (4) der Entwicklung des Karstnetzes (Doerfliger 1996a). Diese Kriterien entsprechen vier spezifischen, die Eigenschaften eines Karstgrundwasserleiters prägenden Charakteristiken. Die Methode erlaubt auf allgemeingültige und nachvollziehbare Weise, die Vulnerabilität von Grundwasser in Karstregionen bezüglich natürlichen und anthropogenen Einflüssen abzuschätzen.

Zuerst muss das Einzugsgebiet der zu schützenden Fassungen bestimmt werden. Danach wird *in drei Schritten vorgegangen*:

(1) Ermittlung der Indizes der vier Kriterien und deren separate Auskartierung - Epikarst, Deckschicht, Infiltrationsverhältnisse und Entwicklung des Karstnetzes - im Einzugsgebiet der Fassungen, wobei das Einzugsgebiet in Elementarflächen unterteilt wird (bevorzugte Verwendung eines Gitters mit 20 m Maschenweite). Dabei wird jedes Kriterium durch einen Index charakterisiert, der die Werte 1 bis 3 oder 4 besitzt. Die Ermittlung der Indizes der vier Kriterien E, P, I und K erfolgt mit Hilfe von verschiedenen, direkten und indirekten, lokal oder regional anwendbaren Methoden, wie beispielsweise geomorphologischen Studien, Hydrogrammanalysen von Hochwasserereignissen, Luftbildinterpretation, Tracerversuchen, Handbohrungen resp. Baggerschlitzten sowie Geophysik.



(2) Berechnung des Schutzfaktors F für jeden Punkt des Einzugsgebietes unter Zuweisung eines numerischen Wertes für jedes indizierte Kriterium, Gewichtung der Kriterien gemäss ihrer Schutzfunktion und Aufsummieren der für die vier Kriterien erhaltenen Werte. Im konkreten Fall werden die vier Karten der indizierten Kriterien übereinandergelegt, um somit eine kartographische Darstellung der Verteilung des Faktors F über das gesamte Einzugsgebiet zu erhalten. Diese Prozedur kann unter Verwendung eines Geographischen Informationssystems (GIS) in vielen Fällen entscheidend vereinfacht werden. Für die Entwicklung der EPIK-Methode wurde eine Windows-Version des Geographischen Informationssystems IDRISI verwendet.



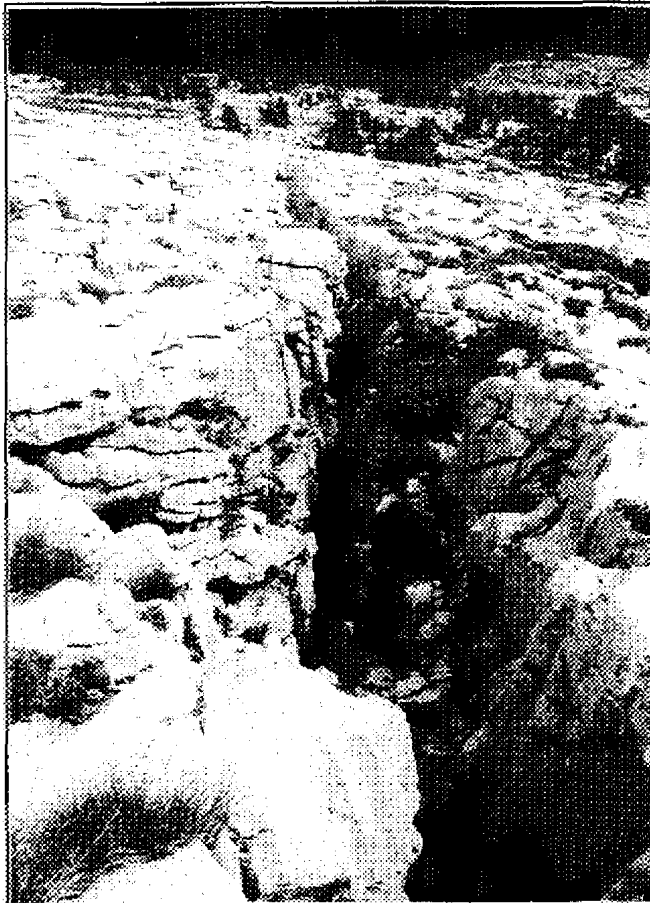
(3) Ausscheidung der Schutzzonen: Dank der Beziehung zwischen dem Faktor F und den Schutzzonen können mit dieser Karte die Grundwasserschutzzonen S1, S2 und S3 auf eine nachvollziehbare Weise ausgeschieden werden.

Im Zuge der Entwicklung der Methode wurden die Werte, Gewichtungsfaktoren und die Beziehung zwischen F und den Schutzzonen bei den oben beschriebenen Schritten 2 und 3 in vier verschiedenen Testgebieten mit unterschiedlichen geologischen Verhältnissen (Faltenjura, Tafeljura, Préalpes médianes und Helvetikum) angepasst und verifiziert.

3.1 Ermittlung der vier Kriterien E, P, I und K

E Epikarst

Die Charakterisierung des Epikarsts basiert hauptsächlich auf dem Studium der Morphologie der Karstoberfläche. Die Betrachtungen im vorgängigen Kapitel über die Eigenschaften des Epikarsts verdeutlichen die Schwierigkeit, diese Zone bezüglich ihrer Ausbildung und der Intensität ihrer Verbindungen zum Karströhrennetz zu charakterisieren. Das Erkennen eines bedeckten Epikarsts ist sogar mittels gängiger geophysikalischer Methoden schwierig, besonders dann, wenn keine ausgeprägten morphologischen Strukturen vorhanden sind. Dem Kriterium E werden die Indizes 1 bis 3 zugeteilt:



Figur 6. Korrosiv erweiterte Spalten im Karrenfeld der Sieben Hengste, BE. (Foto V. Puesch)

- *der Index 1 (E_1)* entspricht dem vulnerabelsten Fall und umfasst Schächte sowie Mulden, in welchen Wasserläufe verschluckt werden (Ponore, Schwinden), im weiteren Dolinen, Karrenfelder, ruinenhafte Reliefs, Cuestas und Aufschlüsse von stark geklüfteten Felspartien (Figur 6). Letztere können beispielsweise entlang von Einschnitten an Verbindungswegen (Strassen, Bahngeleise) oder in Steinbrüchen erkannt werden;
- *der Index 2 (E_2)* umfasst alle Zwischenzonen in Dolinenreihen, Uvalas (Verschmelzung verschiedener Dolinen) sowie Trockentäler, Canyons und grossräumige Senken (Poljen);
- *der Index 3 (E_3)* schliesst den Rest des Einzugsgebietes ein, in welchem die vorgängig aufgezählten, morphologischen Erscheinungen nicht auftreten.

Die Zuweisung der Kriterien E_1 bis E_3 basiert im wesentlichen auf einer geomorphologischen Kartierung. Die topographischen Karten im Massstab 1:5'000, 1:10'000 und 1:25'000 enthalten den grössten Teil der nötigen Informationen. Luftbilder können u.U. zusätzliche Hinweise liefern. Eine Überprüfung der Kartierung im Feld ist ratsam.

P Schutzwirkung durch die Deckschicht (Protektion)

Unter schützender Deckschicht versteht man sowohl den Boden im pedologischen Sinn, als auch andere geologischen Formationen, welche den Karstgrundwasserleiter bedecken können, wie zum Beispiel quartäre Ablagerungen (Moränen, Silt, Löss, Hangschutt) oder andere, nicht verkarstete Formationen wie Tonstein, Sandstein und Mergel (Doerfliger 1996a).

Die Deckschicht zeigt eine starke räumliche Variation, die nicht einfach aus Bodenkarten abgeleitet werden kann, sofern solche überhaupt existieren. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass der pedologischen Bodenklassifikation der Spezialisten keine Parameter als Grundlage dienen, welche das Schutzvermögen eines Bodens definieren, wie beispielsweise die Bodentextur, der Gehalt an organischem Material oder die Wasserdurchlässigkeit.

Die getrennte Kartierung der einzelnen Parameter der Deckschicht im Rahmen der Schutzzonenausscheidung ist aus Kostengründen nicht realistisch. Daher wird für die Abschätzung der Vulnerabilität im Einzugsgebiet *nur die Mächtigkeit der schützenden Deckschicht berücksichtigt* (Doerfliger & Täche 1995, Doerfliger 1996a).

Die Verteilung der schützenden Deckschichten im Einzugsgebiet einer Fassung kann im allgemeinen mit Hilfe *bestehender Dokumente* (geologische Karten, regionale Monographien) eruiert werden. Zusätzlich können Luft- und - je nach Auflösung - auch Satellitenfotos diesbezügliche Informationen liefern und u.U. auch eine Abschätzung der Mächtigkeit der Bodenschicht ermöglichen, sofern diese im Feld an einzelnen Punkten überprüft wird.

Die Mächtigkeit der Bodenschicht wird im Feld mit *Handbohrungen* ermittelt (*Figur 7*). Falls die Oberfläche des Einzugsgebietes nicht allzu gross ist, können die Mächtigkeiten in einem regelmässigen Raster abgetastet werden. Für grössere Flächen, welche z.B. mehr als 15



Figur 7. Messung der Mächtigkeit der Bodenschicht mit einem Handbohrgerät, Jura. (Foto N. Doerfliger)

km² betragen, wird die Maschenweite entsprechend grösser gewählt und es müssen morphologische Aspekte mitberücksichtigt werden, d.h. die an einem Punkt gemessene Mächtigkeit wird allen Punkten innerhalb eines Quadrates von 100 bis 200 m Seitenlänge zugewiesen, bei denen die Morphologie mit jener beim gemessenen Punkt vergleichbar ist. Zusätzlich können Tiefbauarbeiten (z.B. Leitungsbau) wertvolle Auskünfte über die Mächtigkeit der Deckschicht geben.

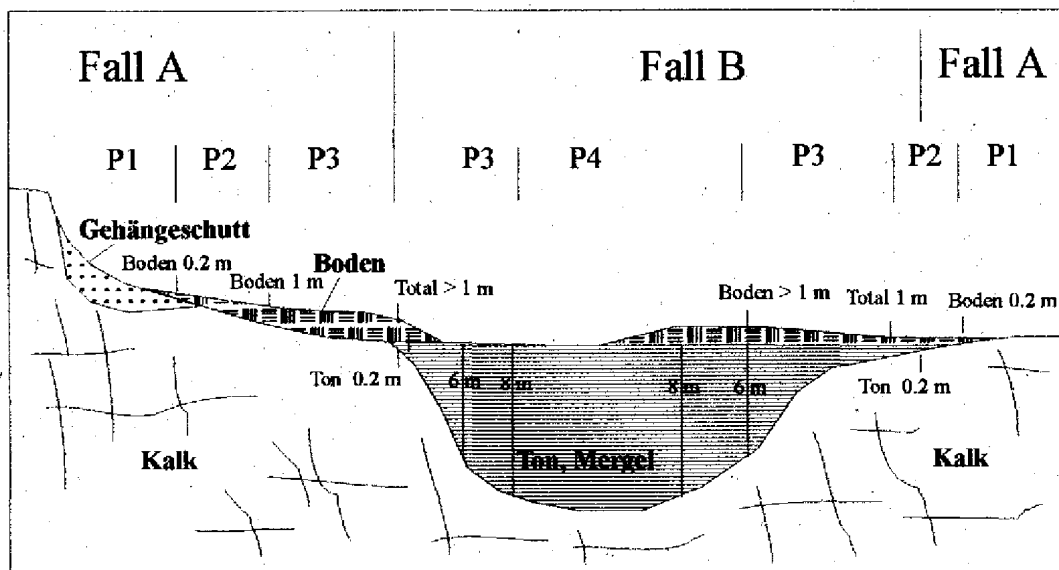
Bei der Zuweisung der Indizes für P (*Figur 8*) wird die Existenz resp. das Fehlen von direkt unter der Bodenschicht liegenden geologischen Formationen mit geringer Wasserdurchlässigkeit berücksichtigt:

A) **Bodenschicht direkt auf Kalkgrundwasserleiter** oder auf Lockergesteinen mit grosser Wasserdurchlässigkeit liegend (z.B. Hangschutt, Seitenmoräne)

- **der Index 1 (P_1)** entspricht einem 0 - 20 cm dicken Boden.
- **der Index 2 (P_2)** entspricht einem Boden mit Mächtigkeiten von 20 - 100 cm.
- **der Index 3 (P_3)** entspricht einem Boden mit Mächtigkeiten > 100 cm.

B) **Bodenschicht direkt auf geologischer Formation mit geringer Wasserdurchlässigkeit liegend** (mindestens 20 cm Seebodenlehm, Ton, Mergel)

- **der Index 1 (P_1)** wird in diesem Falle nicht aufgeführt, da die Schutzwirkung einer weniger als 20 cm dicken, wenig durchlässigen geologischen Formation vernachlässigbar klein ist.
- **der Index 2 (P_2)** entspricht einer Deckschicht, welche aus einem Boden und einer wenig durchlässigen geologischen Formation mit einer Gesamtmächtigkeit von 0.2 bis 1 m besteht. Die Schutzwirkung einer Bodenschicht ist grundsätzlich höher als diejenige einer wenig durchlässigen geologischen Formation gleicher Mächtigkeit.
- **der Index 3 (P_3)** entspricht einer Deckschicht, welche aus einem Boden und einer schlecht durchlässigen Schicht mit Gesamtmächtigkeit > 1 m besteht. Der Boden darf fehlen, jedoch kann schon eine dünne Bodenschicht die leicht geringere Schutzwirkung einer wenig durchlässigen geologischen Schicht stark verbessern.
- **der Index 4 (P_4)** entspricht einer mindestens 8 Meter mächtigen, wenig durchlässigen Schicht mit hohem Ton-/Lehmanteil oder einem mindestens 1 m mächtigen Boden, der sich über einer mindestens 6 m mächtigen Schicht mit geringer Durchlässigkeit befindet. Die Mächtigkeiten der Schichten müssen punktuell verifiziert werden, beispielsweise mittels Bohrungen.



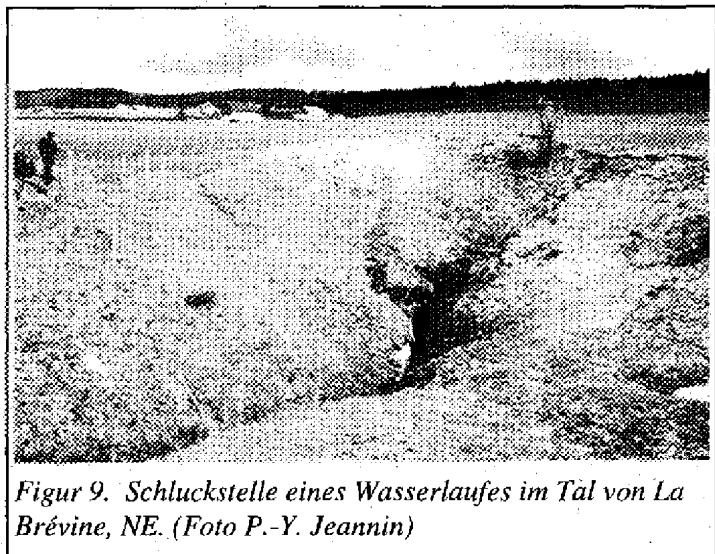
Figur 8. Schematische Darstellung der verschiedenen Indizes bei unterschiedlicher Mächtigkeit der Deckschicht.

Für die Bestimmung der Infiltrationsverhältnisse werden die Zonen mit **konzentrierter Infiltration** (Schluckzonen - *Figur 9* - oder Gerinne von temporären oder ständigen Wasserläufen, künstlich drainierte Zonen) ausgeschieden und die übrige Fläche mit diffuser, **flächenhafter Infiltration** differenziert. Sie wird durch den Abflussbeiwert charakterisiert, der vom **Hanggefälle** und der **Bodennutzung** abhängt.

Aufgrund der Arbeiten von Sautier (1984), in welcher die Grösse dieses Beiwertes in Abhängigkeit des Hanggefälles und der Bodennutzung (Wald, Weiden und Ackergebiete) für die Verhältnisse in der Schweiz zusammengestellt ist, wurden die Grenzen zwischen schwachem und erhöhtem Oberflächenabfluss für Weidegebiete bei 0.22 und für Ackergebiete bei 0.34 festgelegt (der Beiwert 0.34 repräsentiert Ackergebiete, welche in Richtung des Hanggefälles gepflügt wurden). In der weiter unten beschriebenen Zuordnung der Indizes entsprechen diese Grenzneigungen einem Gefälle von 25 resp. 10 % (Doerfliger 1996a).

Für die Bestimmung von I wird zwischen dem Gebiet innerhalb (Fall A) und ausserhalb (Fall B) des **Einzugsgebietes von Wasserläufen und Schluckstellen** unterschieden; ausserhalb solcher Einzugsgebiete wirken **Hangfusszonen** oft als Wassersammler.

Die nötigen Angaben für die Charakterisierung der Infiltrationsverhältnisse werden über das Studium der topographischen Einzugsgebiete von Wasserläufen, welche Schluckstellen speisen, mittels topographischer Karten beschafft. Die Abgrenzung von kritischen Hanggefällen und Hangfusszonen geschieht ebenfalls mittels topographischer Karten. Steht ein digitales Geländemodell zur Verfügung, können solche Zonen auf einfache Weise mit Hilfe eines geographischen Informationssystems bestimmt werden, was mit einer grossen Zeitersparnis verbunden ist.



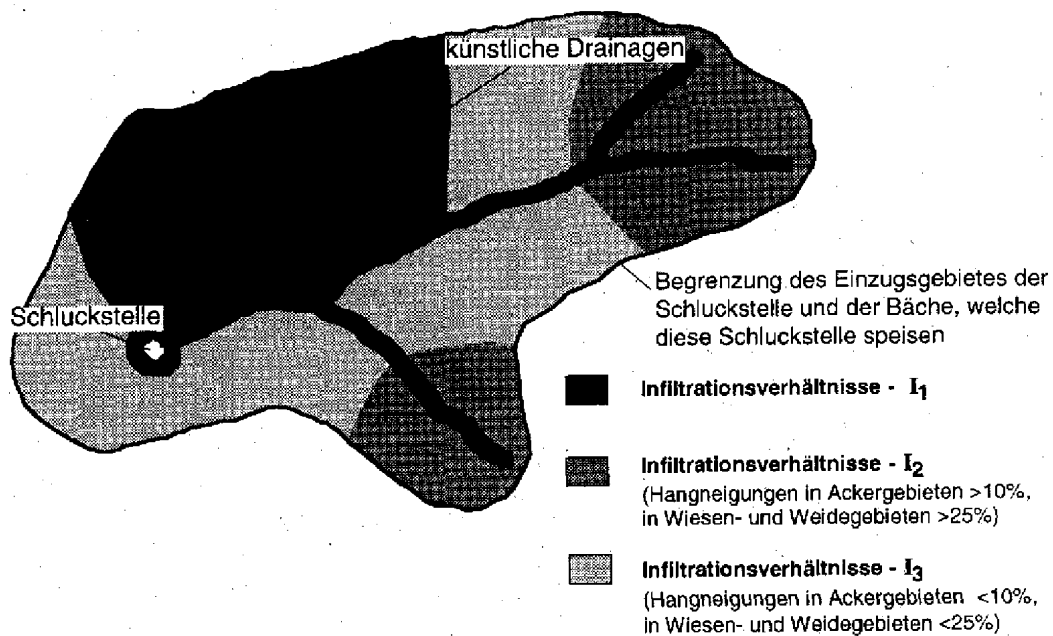
Figur 9. Schluckstelle eines Wasserlaufes im Tal von La Brévine, NE. (Foto P.-Y. Jeannin)

Zur Charakterisierung der Infiltrationsverhältnisse I bestehen 4 Indizes (I_1 am vulnerabelsten - I_4 am wenigsten vulnerabel); zudem sind die Fälle A und B innerhalb resp. ausserhalb des Einzugsgebietes eines Baches, der eine Schluckstelle speist, zu beachten:

A) Innerhalb des Einzugsgebietes von Schluckstellen und Wasserläufen (Figur 10)

- **der Index 1 (I_1)** charakterisiert ständige oder temporäre Schluckstellen, ständig oder temporär fliessende Bäche, welche Schluckstellen speisen, infiltrierende Oberflächengewässer sowie Teile des Einzugsgebietes eines solchen Baches, die künstlich drainiert werden.
- **der Index 2 (I_2)** beinhaltet Teile des Einzugsgebietes von Schluckstellen oder unter I_1 genannten Bächen, welche nicht künstlich drainiert werden und einen erhöhten Oberflächenabfluss aufweisen, Bereiche also mit Hangneigungen von $> 10\%$ in Ackergebieten resp. $> 25\%$ in Wiesen- und Weidegebieten.

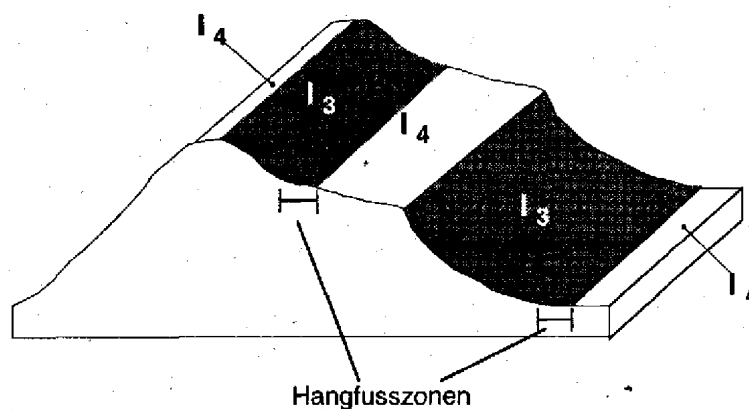
- **der Index 3 (I_3)** umfasst Teile des Einzugsgebietes von Schluckstellen oder unter I_1 genannten Bächen, welche nicht künstlich drainiert werden und einen geringen Oberflächenabfluss aufweisen resp. deren Hangneigungen $< 10\%$ in Ackergebieten resp. $< 25\%$ in Wiesen- und Weidegebieten betragen.



Figur 10. Infiltrationsverhältnisse im Einzugsgebiet (Fall A) einer Schluckstelle und der Bäche, welche diese Schluckstelle speisen.

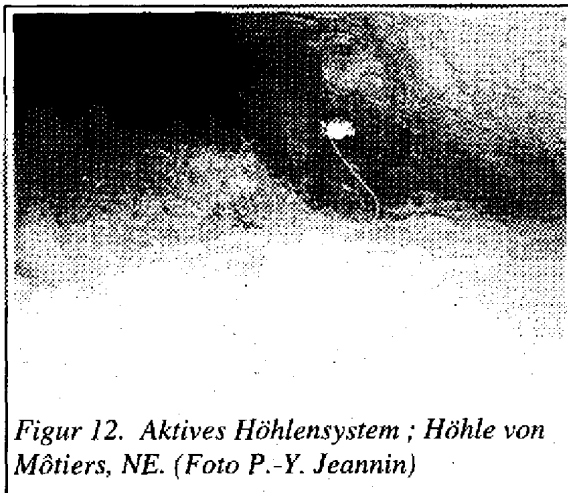
B) Ausserhalb des Einzugsgebietes von Schluckstellen und Wasserläufen (Figur 11)

- **der Index 3 (I_3)** gilt für Hangfusszonen, in welchen sich das Hangwasser ansammelt, darin eingeschlossen die Abhänge mit einem erhöhten Oberflächenabfluss, d.h. Bereiche mit Hangneigungen $> 10\%$ in Ackergebieten resp. $> 25\%$ in Wiesen- und Weidegebieten, von welchen das Hangwasser zufließt.
- **der Index 4 (I_4)** gilt für den Rest des Einzugsgebietes.



Figur 11. Infiltrationsverhältnisse ausserhalb des Einzugsgebietes (Fall B) von Schluckstellen und Bachläufen (geringes und starkes Hanggefälle, Hangfusszonen).

Die Vulnerabilität wird durch das Vorhandensein eines Karströhrensystems und dem Grad der Vernetzung bestimmt. Zur Abschätzung der Bedeutung des Karströhrennetzes bezüglich des umliegenden, wenig durchlässigen Volumens (geklüftet oder nicht) werden verschiedene Merkmale berücksichtigt.



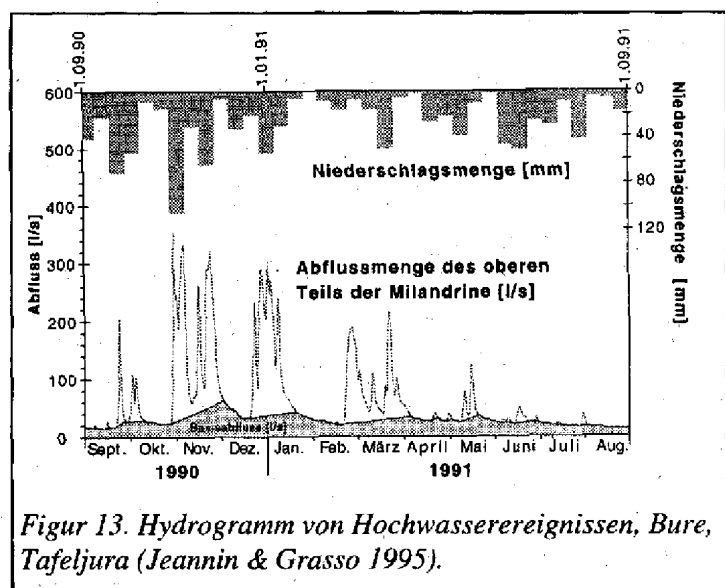
Figur 12. Aktives Höhlensystem; Höhle von Môtiers, NE. (Foto P.-Y. Jeannin)

Erste Hinweise auf ein Karströhrennetz sind **direkt sichtbare** Elemente wie beispielsweise Höhlen, vertikale Schächte und aktive Höhlensysteme (Figur 12) innerhalb des Einzugsgebietes. Fehlen solche sichtbaren Anzeichen, muss auf **indirekte Methoden** ausgewichen werden, wie beispielsweise die Analyse von Hydrogrammen oder die Interpretation von Markierversuchen und der Variabilität der Wasserqualität.

Die **Hydrogramme von Hochwasserereignissen** (Figur 13) - namentlich die aus Hydrogrammen ermittelte Reaktionszeit einer Quelle auf Regenereignisse - liefern wichtige Hinweise betreffend Entwicklungsgrad eines Karstsystems. Trifft eine Reaktion auf Starkniederschläge (mindestens das Doppelte des Basisabflusses) rasch ein und nimmt die Schüttungsmenge einer Quelle danach rasch ab, kann die Existenz eines Karströhrennetzes angenommen werden. Eine Reaktion im Zeitraum von etwa 6 bis 12 Stunden (je nach Grösse des Einzugsgebietes) nach einem Regenereignis mit einer Niederschlagsmenge von über 15 mm wird als rasch taxiert. Diese Regel gilt nicht uneingeschränkt, wenn der Verdunstungsanteil bedeutend ist.

Die aus **Markierversuchen** berechneten, mittleren Abstandsgeschwindigkeiten erlauben, die Existenz oder das Fehlen eines aktiven Karstes zu erkennen. Eine Geschwindigkeit von über 15 m/h ab einer Schluckstelle in einer Trockenperiode und über 75 m/h in einer Regenperiode spricht für die Existenz eines Karstsystems.

Eine Änderung der **Wasserqualität** einer Quelle infolge eines Unwetters ist ebenfalls ein Zeichen für die Existenz eines Karstnetzes. Ändert die Wasserqualität bezüglich Bakteriologie nach ergiebigen Niederschlägen praktisch nicht, kann vermutet werden, dass das Karströhrennetz entweder wenig entwickelt oder dass es durch ein poröses Milieu geschützt ist; das gesamte System reagiert ähnlich wie ein Kluftaquifer. Im gegenteiligen Fall kann ein aktives Karstsystem angenommen werden.



Figur 13. Hydrogramm von Hochwasserereignissen, Bure, Tafeljura (Jeannin & Grasso 1995).

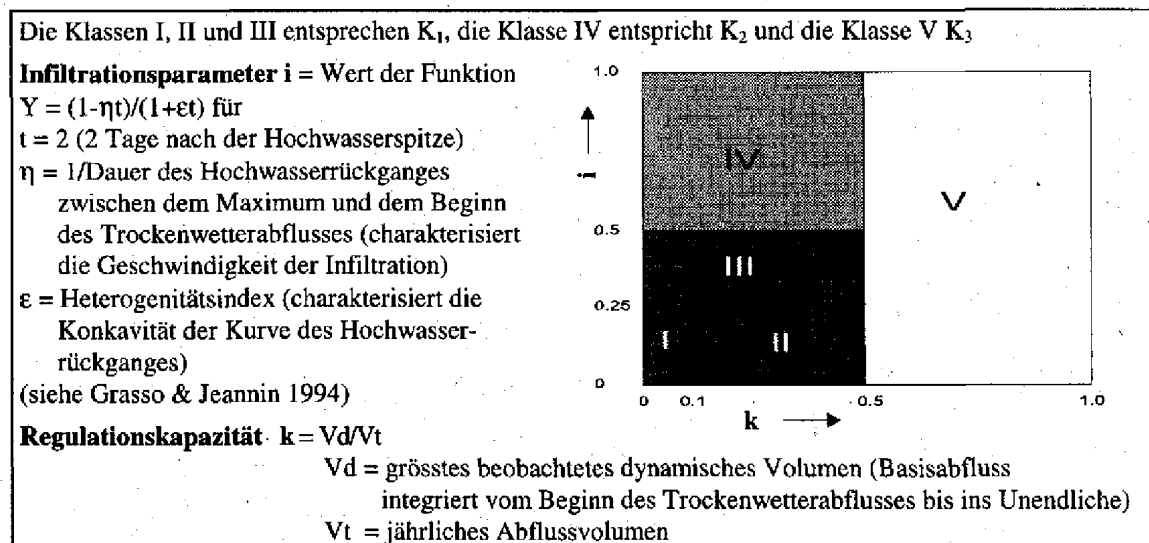
Ein letztes Merkmal ergibt sich aus der **Anzahl** der aus einem Karstsystem entspringenden **Quellen**. Ein gut entwickeltes System besitzt nur einen einzigen Ausfluss, währenddem ein wenig entwickeltes System sehr oft mehrere Quellen besitzt. Dies folgt aus dem Modell von Mangin (1975), wonach ein Karstsystem einen hierarchischen Aufbau besitzt.

Zur Charakterisierung von K werden drei Indizes unterschieden:

- **der Index 1 (K_1)** für ein mässig bis gut ausgebildetes Karstnetz mit Röhren im Dezimeter- bis Meterbereich, die sehr wenig kolmatiert und gut miteinander vernetzt sind;
- **der Index 2 (K_2)** für ein schlecht entwickeltes Karstnetz, deren Röhren kolmatiert oder schlecht miteinander vernetzt sind oder deren Durchmesser im Dezimeterbereich oder darunter liegen;
- **der Index 3 (K_3)** für Systeme mit Austritt ins Lockergestein, was eine gewisse Schutzwirkung bietet (die Schutzwirkung ist mittels wiederholter Wasseranalysen zu verifizieren) sowie nicht verkarstete, klüftige Kalkaquifere.

Der Index für das Kriterium K wird meist global für das ganze Einzugsgebiet ermittelt. Man kann den Index jedoch auch nach Teileinzugsgebieten differenzieren, sofern diese entsprechend charakterisiert werden können.

Ohne speläologische Informationen ist eine Unterscheidung zwischen K_1 und K_2 nicht immer offensichtlich. Verfügt man innerhalb eines Jahreszyklus über mindestens ein Hydrogramm eines Hochwasserereignisses, kann die Methode von Mangin (1975) zur Klassifikation von Karstgrundwasserleitern angewendet werden. Diese beruht auf zwei Parametern, der Regulationskapazität des Grundwasserleiters k und der Infiltration i . Der Parameter k ist als Verhältnis des dynamischen Volumens (aus Integration des Abflusses vom Beginn des Trockenwetterabflusses bis ins Unendliche berechnet) zum jährlichen Abflussvolumen definiert. Der Parameter i (siehe Definition **Figur 14**) ist ein Mass für die zeitliche Verzögerung zwischen Infiltrationsereignis und Abfluss in der Quelle. Mangin unterscheidet 5 Klassen, wobei die Klassen I bis III mit dem Kriterium K_1 assoziiert werden können, die Klasse IV mit K_2 und die Klasse V mit K_3 . Es muss angemerkt werden, dass die Klassifikation eines Grundwasserleiters auf Grund des Verlaufs von Trockenwetterganglinien nicht immer eindeutig ist: während der Parameter k von einem Hochwasserereignis zum andern wenig variiert, hängt der Parameter i stark von den Niederschlägen ab, welche zum Hochwasserabfluss führten (Grasso & Jeannin 1994). Die Unterscheidung zwischen den Kriterien K_1 und K_2 nach dieser Methode hängt damit nicht nur von der Art des Grundwasserleiters ab.



Figur 14. Klassifikation der Karstaquifere nach Mangin (1975).

Zusammenfassung

Die **Tabelle 1** fasst die Merkmale der 4 Kriterien E, P, I und K zusammen.

Tabelle 1. Indizierung der Kriterien E, P, I und K.

Karstmorphologie vorhanden (in Verbindung mit dem Epikarst)	E ₁	Schacht, Ponor (Schluckstelle, Schwinde), Doline, Karrenfeld, ruinenhaftes Relief, Cuesta
	E ₂	intermediäre Zonen in Dolinenreihen; Uvalas, Trockentäler, Canyons, grossräumige Senken (Poljen)
Karstmorphologie fehlend	E ₃	Rest des Einzugsgebietes

		A. Boden direkt auf Kalkuntergrund oder auf Lockergesteinen mit grosser Wasserdurchlässigkeit* liegend	B. Boden direkt auf geologischer Formation (Mächtigkeit > 20 cm) mit geringer Wasserdurchlässigkeit** liegend
schützende Deckschicht fehlend	P ₁	Boden 0 - 20 cm	
	P ₂	Boden 20 - 100 cm	Boden und gering durchlässige Formation: 20 - 100 cm
	P ₃	Boden > 1 m	Boden und gering durchlässige Formation > 1 m
schützende Deckschicht bedeutend	P ₄		gering durchlässige Formation > 8 m; oder gering durchlässige Formation > 6 m plus > 1 m Boden (punktuelle Verifizierung notwendig)

konzentrierte Infiltration	I ₁	ständige oder temporäre Schluckstelle; Bett und Ufer eines ständig oder temporär fliessenden Baches, welcher eine Schluckstelle oder Doline speist; infiltrierendes Oberflächengewässer; Teile des Einzugsgebietes eines solchen Baches, die künstlich drainiert werden
	I ₂	Teile des Einzugsgebietes eines (unter I ₁ zitierten) Baches, welche nicht künstlich drainiert werden, mit einer Hangneigung von > 10% in Ackergebieten resp. > 25% in Wiesen- und Weidegebieten
	I ₃	Teile des Einzugsgebietes eines (unter I ₁ zitierten) Baches mit einer Hangneigung von < 10% in Ackergebieten resp. < 25% in Wiesen- und Weidegebieten. Ausserhalb des Einzugsgebietes Hangfusszonen, in welchen sich das Hangwasser ansammelt und ausgeprägte Hangzonen, von welchen das Hangwasser zufliesst (Hangneigung > 10% in Ackergebieten resp. > 25% in Wiesen- und Weidegebieten)
diffuse Infiltration	I ₄	Rest des Einzugsgebietes

Karstnetz gut ausgebildet	K ₁	Röhren im Dezimeter- bis Meterbereich, sehr wenig kolmatiert, gut miteinander vernetzt
Karstnetz schlecht entwickelt	K ₂	Röhren kolmatiert oder schlecht vernetzt oder Durchmesser im Dezimeterbereich oder darunter
gemischter oder geklüfteter Grundwasserleiter	K ₃	Austritt im Lockergestein, das eine gewisse Schutzwirkung bietet; nicht verkarsteter Klüftgrundwasserleiter

* Beispiele: Hangschutt, Seitenmoräne

** Beispiele: Lehm, Ton

3.2 Berechnung des Schutzfaktors F

Die Verknüpfung der vier vorgängig beschriebenen, indizierten Kriterien erlaubt die Bestimmung des Schutzfaktors F für jeden Punkt des Einzugsgebiets. Der Schutzfaktor F berechnet sich nach folgender Formel:

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l \quad (1)$$

wobei F: Schutzfaktor

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: Gewichtungskoeffizienten der vier Kriterien

E_i, P_j, I_k, K_l : Wert jedes indizierten Kriteriums

Bewertung der Indizes für die Kriterien E, P, I und K

Der Bewertung der Indizes für die Kriterien E, P, I und K in der Gleichung (1) wurden verschiedene Schlüsselsituationen zu Grunde gelegt wie z.B.:

- Eine Doline, welche mit einer mächtigen Bodenschicht (E_1+P_3) bedeckt ist, entspricht einer vulnerableren Situation als eine kompakte Kalkplatte mit einer dünnen Bodenschicht (E_3+P_1).
- Ein versickernder Wasserlauf (I_1) entspricht einer sehr vulnerablen Situation, unabhängig von der schützenden Deckschicht.
- Ein Trockental (E_2) und ein Hangfuss, wo sich flächenhaft abfließendes Meteorwasser ansammelt (I_3), sind etwa gleich vulnerabel.

Die Zahlenwerte der Indizes für die Kriterien E, P, I und K zur Berechnung des Schutzfaktors F sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Tabelle 2: Wert der indizierten Kriterien E, P, I und K .

E_1	E_2	E_3	P_1	P_2	P_3	P_4	I_1	I_2	I_3	I_4	K_1	K_2	K_3
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

NB: Der tiefste Wert entspricht der grössten Vulnerabilität

Gewichtungskoeffizienten

Der Epikarst (E) und die Infiltrationsverhältnisse (I) beeinflussen die Vulnerabilität des Karstgrundwassers am stärksten, darum erhalten diese beiden Kriterien bei der Bewertung des Schutzfaktors F einen Gewichtungskoeffizienten von 3 (α und $\gamma = 3$). Das Kriterium P (Protektion durch Deckschicht) wirkt sich am wenigsten auf den Wert des Schutzfaktors aus und erhält darum den Gewichtungskoeffizienten 1 ($\beta = 1$). Das Kriterium K (Entwicklung des Karströhrensystems) besitzt mit dem Gewichtungskoeffizienten $\delta = 2$ ein mittleres Gewicht (**Tabelle 3**).

Tabelle 3: Gewichtungskoeffiziente der Kriterien E, P, I und K.

Kriterium	E	P	I	K
Gewichtungskoeffizient	α	β	γ	δ
relative Gewichtung	3	1	3	2

Das Kriterium P (Protektion durch Deckschicht) wirkt sich am wenigsten auf den Wert des Schutzfaktors aus und erhält darum den Gewichtungskoeffizienten 1 ($\beta = 1$). Das Kriterium K (Entwicklung des Karströhrensystems) besitzt mit dem Gewichtungskoeffizienten $\delta = 2$ ein mittleres Gewicht (**Tabelle 3**).

Schutzfaktor






Aus den verschiedenen möglichen Kombinationen ergeben sich nach der Gleichung (1) für den Schutzfaktor F Werte zwischen 9 und 34. Sind die Werte für den Schutzfaktor für jeden Punkt des Einzugsgebietes bekannt, kann F in einer Karte dargestellt werden. Ein höherer Wert von F entspricht einer höheren Schutzwirkung. In **Tabelle 4** sind die verschiedenen Werte von F mit drei verschiedenen Schraffuren und ihre Verknüpfung mit den Schutzzonen S1 bis S3 dargestellt (vgl. folgender Abschnitt). Die Kombinationen, welche im Gelände nicht existieren ($I_1 + E_1 + P_{3,4}$, Schluckstelle in Doline mit mächtiger Bodenschicht), sind speziell markiert.

Tabelle 4. Wert der Schutzfaktoren.

K ₁ =1	I ₁ =1			I ₂ =2			I ₃ =3			I ₄ =4		
	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4
P ₁ =1	9	15	18	12	18	21	15	21	24	18	24	27
P ₂ =2	10	16	19	13	19	22	16	22	25	19	25	28
P ₃ =3		17	21	14	21	23	17	23	26	20	26	29
P ₄ =4		18	22	15	22	24	18	24	27	21	27	30

K ₁ =2	I ₁ =1			I ₂ =2			I ₃ =3			I ₄ =4		
	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4
P ₁ =1	11	17	20	14	20	23	17	23	26	20	26	29
P ₂ =2	12	18	21	15	21	24	18	24	27	21	27	30
P ₃ =3		19	22	16	22	25	19	25	28	22	28	31
P ₄ =4		20	23	17	23	26	20	26	29	23	29	32

K ₁ =3	I ₁ =1			I ₂ =2			I ₃ =3			I ₄ =4		
	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4	E ₁ =1	E ₂ =3	E ₃ =4
P ₁ =1	13	19	22	16	22	25	19	25	28	22	28	31
P ₂ =2	14	20	23	17	23	26	20	26	29	23	29	32
P ₃ =3		21	24	18	24	27	21	27	30	24	30	33
P ₄ =4		22	25	19	25	28	22	28	31	25	31	34

	Situation, welche im Gelände nicht existiert
	Schutzfaktor, welcher der Schutzzone S1 entspricht
	Schutzfaktor, welcher der Schutzzone S2 entspricht
	Schutzfaktor, welcher der Schutzzone S3 entspricht
	Verhältnisse im restlichen Teil des Einzugsgebietes

Die Kombinationen von P_4 und E_1 sind selten und schwierig zu erkennen. Diejenigen von E_1 und I_4 (Karrenfeld, Cuesta etc. ausserhalb des Einzugsgebietes einer Schluckstelle oder eines Baches) sind wenig häufig (beim Beispiel von Lenk - vgl. Kapitel 4.2 - machen sie dennoch 10% des kartierten Gebietes aus). Die häufigsten Kombinationen sind jene von E_3, E_2 mit I_4, I_3, I_2 . Im Gebiet von Lenk (Kapitel 4.2) machen die Kombinationen von E_3 mit P_1, P_3 und I_2, I_4 82% des kartierten Gebietes aus. Im Fall von St-Imier (Kapitel 4.1) überwiegen die Kombinationen von E_2, E_3 mit I_3, I_4 und P_2, P_3 .

3.3 Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen

Die Beziehung zwischen dem Faktor F und den Schutzzonen wurde im Rahmen der Entwicklung der Methode und der Untersuchungen in Testgebieten des Juras, der Préalpes médianes und des Helvetikums gründlich geprüft.

Der Herleitung dieser Beziehung liegen hauptsächlich folgende Überlegungen zu Grunde:

- Schluckstellen und gegebenenfalls Bäche, welche solche speisen (I_1), müssen der Schutzzone $S1$ zugeteilt werden.
- Dolinen, Karrenfelder und Cuestas (E_1) müssen i.a. der Schutzzone $S1$ zugeteilt werden. Bei einer grossen Überdeckung oder ausserhalb des Einzugsgebietes von Schluckstellen liegen sie jedoch in der Schutzzone $S2$.
- Die mit E_2 und I_3 klassifizierten Bereiche werden vorzugsweise der Schutzzone $S2$ zugeteilt.
- Trockentäler sind im allgemeinen der Schutzzone $S2$ zuzuweisen.
- Die Bereiche, in denen der Schutzfaktor über 25 liegt, werden der Schutzzone $S3$ zugeteilt.
- Die Bereiche, in denen der Schutzfaktor über 25 liegt und welche eine bedeutende schützende Deckschicht aufweisen (P_4 , mit geeigneten Untersuchungsmethoden zu verifizieren) müssen ausserhalb der Zone S ("*Rest des Einzugsgebietes*") eingeteilt werden, sofern es sich um ein Gebiet von bedeutender Grösse handelt.

Im Verlauf der Entwicklung der Methode anhand verschiedener konkreter Beispiele zeigte sich, dass für die Zone $S1$ die Grenzwerte des Schutzfaktors F bei etwa 20 liegen würden (F von 9 bis 19 für ein gut entwickeltes Karströhrennetz - K_1 , und von 11 bis 21 für ein schlecht entwickeltes Karströhrennetz - K_2). In der Zone $S2$ würden sie bei etwa 25 liegen (F von 20 bis 24 für K_1 und von 22 bis 26 für K_2). In der Zone $S3$ befänden sich die Werte von F zwischen 26 und 31 und im *Rest des Einzugsgebietes* zwischen 26 und 34 (zusätzlich mit dem indizierten Kriterium P_4 und $I_{3,4}$).

Zwecks Nachvollziehbarkeit der Methode wurde die Beziehung zwischen dem Schutzfaktor F und den Schutzzonen S klar definiert, wie sie in *Tabelle 5* dargestellt ist. Diese Tabelle zeigt auch eine Klassierung der Vulnerabilität.

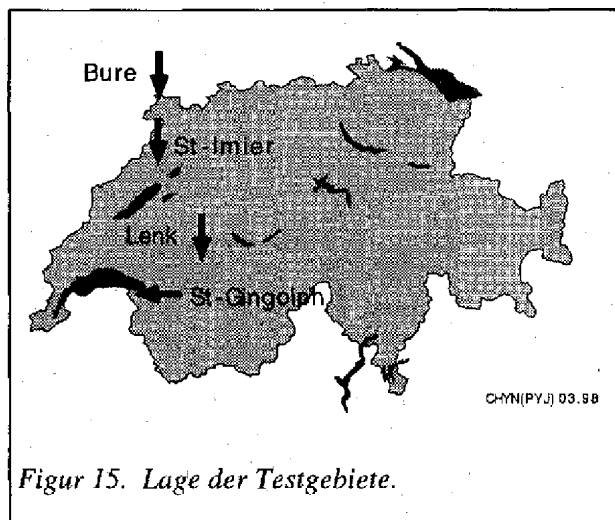
Tabelle 5. Beziehung zwischen den Schutzfaktoren F und den Schutzzonen S.

Vulnerabilität	Schutzfaktor F	Schutzzone
sehr hoch	F von 9 bis 19	S1
hoch	F von 20 bis 25	S2
mässig	F grösser als 25	S3
gering	F grösser als 25 und Indexwerte $P_{4+}(I_3 \text{ bis } L_4)$	Rest des Einzugsgebietes

3.4 Anpassung und Verifizierung der Methode

Die Werte der Indizes und der Gewichtungskoeffizienten sowie die Beziehung zwischen dem Faktor F und den Schutzzonen wurden auf empirische Weise bestimmt, d.h. iterativ und nach verschiedenen Empfindlichkeitstests in den untersuchten Gebieten (Tâche et al. 1996). Diese Gebiete (**Figur 15**) befinden sich im Faltenjura (St-Imier), im Tafeljura (Bure), in den Préalpes médianes (St-Gingolph) und im Helvetikum (Lenk).

Mit Tests, welche u.a. auch Markierversuche und detaillierte geophysikalische Untersuchungen in Gebieten mit geringer, mässiger und hoher Vulnerabilität beinhalteten, wurden sowohl die gewählten Werte der Indizes und deren Gewichtung als auch die gewählten Grenzwerte für die Beziehung zwischen dem Vulnerabilitätsgrad und den



Figur 15. Lage der Testgebiete.

Schutzzonen festgelegt und überprüft. Die Resultate dieser Untersuchungen zeigten für die vorgeschlagenen Werte ein kohärentes und vernünftiges Bild. **Die erhaltenen Werte sind generell auf die in der Schweiz angetroffenen Verhältnisse im Jura, den Préalpes und dem Helvetikum anwendbar.**

In der Praxis ist die systematische Kontrolle der Bestimmung der Vulnerabilität mittels Markierversuchen oder geophysikalischen Methoden nicht immer notwendig. Scheint jedoch der Wert des Schutzfaktors F für eine bestimmte geologische und hydrologische Situation unrealistisch, sind zusätzliche Kontrolluntersuchungen wie beispielsweise Markierversuche bei hohem und niedrigem Wasserstand gerechtfertigt.

4 ZWEI FALLSTUDIEN ALS ANWENDUNGSBEISPIELE

Als Anwendungsbeispiele für die Kartierung der Vulnerabilität mit Hilfe der EPIK-Methode werden im folgenden die Resultate aus einem Testgebiet im Faltenjura (St-Imier / BE) und in den Helvetischen Kalkalpen (Lenk / BE) vorgestellt. Es sind dies zwei Beispiele, welche die Durchführbarkeit der EPIK-Methode zur Ausscheidung von Schutzzonen in Karstgebieten demonstrieren. Sie veranschaulichen die geographische Verteilung der Werte der Indizes, der Vulnerabilitätszonen und der daraus resultierenden Schutzzonen. Sie zeigen sowohl die angewendeten Charakterisierungsmethoden als auch die sich daraus ergebenden Probleme auf. Am Schluss werden noch einige Angaben über den Zeitaufwand im Feld und im Büro erörtert.

4.1 Beispiel des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier

Einleitung

Die Quellen von la Raissette, la Grande Dou, la Petite Dou und die Torrent-Quelle liegen in der Talmulde von St-Imier (Berner Jura) auf dem Gemeindegebiet von Cormoret. Die Quelle von la Grande Dou wird nicht gefasst, währenddem die drei anderen für verschiedene öffentliche Verteilnetze wie dasjenige von St-Imier genutzt werden.

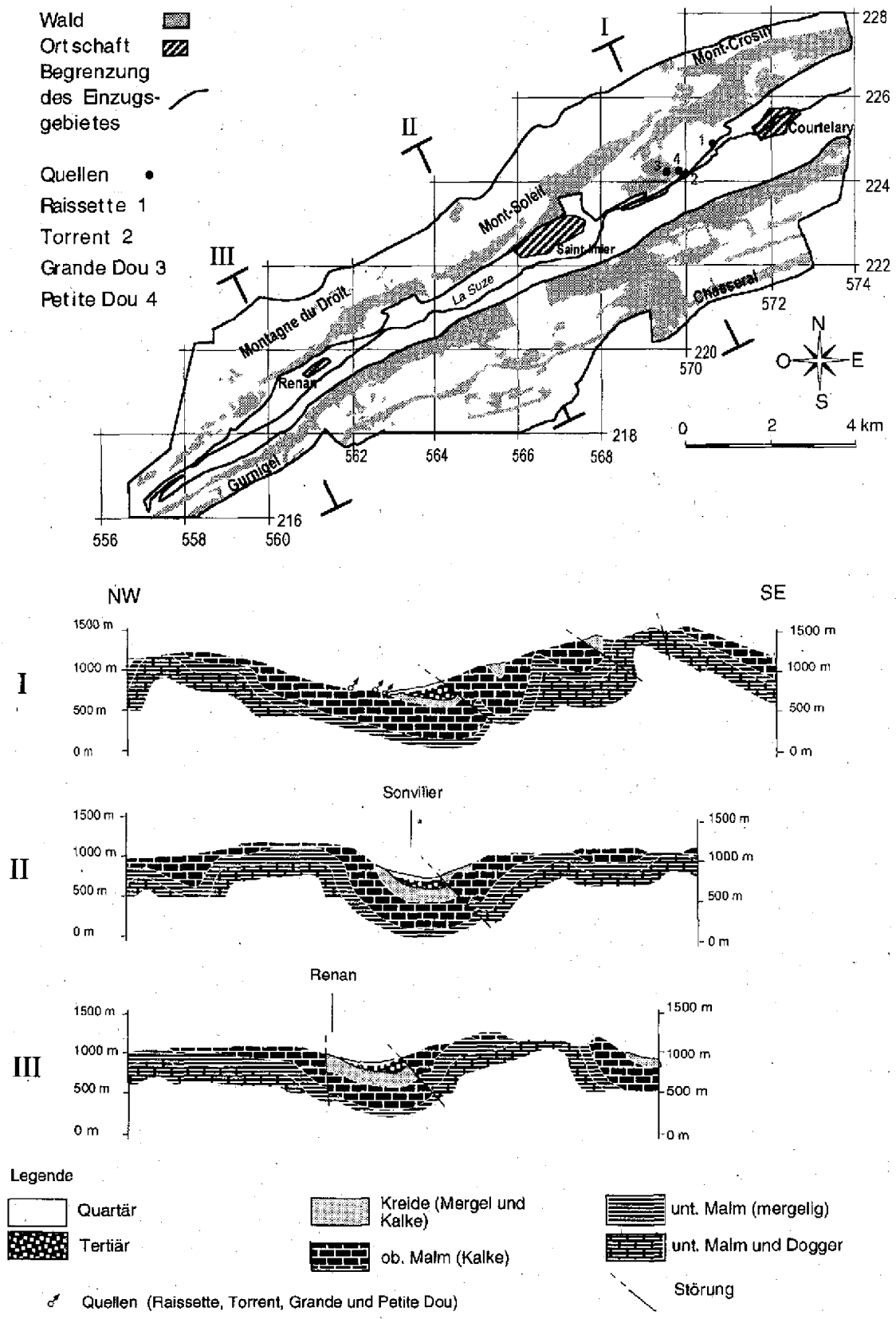
Die Einzugsgebiete der vier Quellen mit einer Gesamtfläche von ungefähr 120 km² liegt in den Kantonen Bern und Neuenburg. Die vorliegende Studie beschränkt sich auf das im Kanton Bern liegende, ca. 70 km² umfassende Teilgebiet.

Die untersuchte Region gehört geologisch zum Faltenjura (*Figur 16*). Der ca. 200 bis 400 m mächtige Grundwasserleiter besteht aus geklüfteten und verkarsteten Malmkalcken des Séquanien bis Portlandien. Er wird gegen unten durch die mergelige Serie des Argovien (unt. Malm) begrenzt und gegen oben durch Kreide- und Molasse-Schichten, welche nur im Synklinaltal von St-Imier vorhanden sind. Das Einzugsgebiet der Quellen umfasst den Nordschenkel der Antiklinale Gurnigel - Chasseral und den Südschenkel der Antiklinale Montagne du Droit - Mont-Soleil - Mont-Crosin. Beide Antiklinalen verlaufen generell in Richtung SW-NE.

Die Raissette-, die Grande und Petite Dou- sowie die Torrent-Quelle liegen zwischen 720 und 750 m ü. M. und sind Überlaufquellen (Jäckli AG & OEHE 1981). Das Wasser tritt in tiefgelegenen Aufschlüssen von Malmkalk zu Tage.

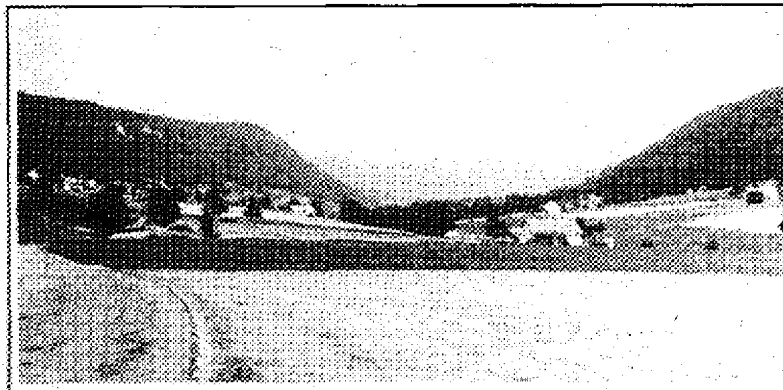
Die Schutzzonen wurden bereits in den 80-er Jahren ausgeschieden, und zwar nur für den nördlichen Teil des Einzugsgebietes (Schindler 1988). Danach deckt die Zone S3 praktisch das gesamte Gebiet ab. Die Schutzzonen S1 und S2 umfassen nur gerade zwei die Quellen umgebende Flächen von ungefähr 0.04 km². Trotz der damals ausgeschiedenen Schutzzonen traten im Mittel 4 mal jährlich, in Zeiten von Schneeschmelze und heftigen Sommergewittern, Verunreinigungen im Quellwasser auf, welche von der Landwirtschaft (Jaucheaustrag) stammten.

Mit der Ausscheidung von neuen Grundwasserschutzzonen nach der EPIK-Methode wurde versucht, die regelmässigen Trinkwasserverschmutzungen in diesem Gebiet zu beheben. Die besonders vulnerablen Flächen im Einzugsgebiet sollten erkannt und entsprechend geschützt werden.



Figur 16. Geographische Situation des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier (BE) und dazugehörige geologische Schnitte.

Die Begrenzung des Einzugsgebietes wurde in Zusammenarbeit mit der Geotest AG, Zollikofen, unter Zuhilfenahme von Resultaten aus Markierversuchen, von Schutzzonenberichten und Berichten über die regionale Hydrogeologie festgelegt (Jäckli AG & OEHE 1981, Schindler 1988). Der hauptsächlich aus tertiären und quartären Ablagerungen aufgebaute Talgrund (*Figur 17*) gehört nicht zum Einzugsgebiet.



Figur 17.
 Ansicht des oberen Teils
 des Tales von St-Imier mit
 Blickrichtung nach Nord-
 osten. Beidseits des Tales
 sind die bewaldeten Anti-
 kinalen des Montagne du
 Droit und des Gurnigel er-
 kennbar.
 (Foto F. Pasquier)

Im Beispiel St-Imier wurden Waldgebiete von Anfang an der Zone S2 zugeteilt, um permanente Holzdepots und der auf diese Stellen konzentrierte Einsatz von Pestiziden zu vermeiden. Waldgebiete wurden somit gar nicht in die Vulnerabilitätsbetrachtungen einbezogen. In der Folge konnten diese Gebiete gar der Zone S3 zugeteilt werden, da die Waldbesitzer darauf hinwiesen, dass sie keine permanenten Lagerplätze benötigten und die Verschmutzungsgefahr des Grundwasser durch Pestizide daher minim ist.

Bestimmung der Kriterien E, P, I und K

E - Epikarst (Anhang 1)

Für das Einzugsgebiet der Quellen von St-Imier wurde die Existenz und die Ausbildung des Epikarsts ohne grossen und teuren Untersuchungsaufwand, hauptsächlich unter Zuhilfenahme von Felddcobachtungen (z.B. Karstrelief, Aufschlussverhältnisse), geomorphologischen Studien und Luftbildern, abgeschätzt. Die von Hand ausgeführte Karte wurde in den Computer eingelesen und in 10 m grosse Elementarflächen unterteilt. Für P und I wurden die gleichen Elementarflächen verwendet.

P - Schutzwirkung durch die Deckschicht (Protektion) (Anhang 2)

Im Untersuchungsgebiet besteht die schützende Deckschicht hauptsächlich aus dem Boden. Es wurden nur an wenigen Orten detritische, quartäre Ablagerungen angetroffen. Die Bestimmung des Indexes des Kriteriums P beruht hier hauptsächlich auf einer Abschätzung der Mächtigkeit des Bodens, welche mit etwa 100 Handbohrungen ermittelt wurde. Obwohl die Methode für die Abgrenzung von P₂ zu P₃ 1 m Bodenmächtigkeit festlegt, wurde die Grenze für das vorliegende Beispiel bei 0.5 m angenommen, da sich der Grenzwert 1 m erst im Laufe der Entwicklung der Methode ergab.

I - Infiltrationsverhältnisse (Anhang 3)

Dieses Kriterium wurde unter Zuhilfenahme eines digitalen Geländemodells und topographischer Karten bestimmt. Das gesamte Einzugsgebiet - mit Ausnahme der Waldgebiete - wurde als Wiesen- und Weidegebiet betrachtet, was mehr oder weniger der Wirklichkeit entspricht. Dies bedeutet, dass lediglich die Gebiete mit Hangneigungen von über 25% von denjenigen mit geringerer Neigung unterschieden wurden.

Das topographische Einzugsgebiet von Schluckstellen und von fliessenden Bächen, welche solche Schluckstellen speisen, wurde mit Hilfe eines geographischen Informations-

systems (GIS) und dem digitalen Geländemodell unter Verwendung eines Gitters mit der Maschenweite von 50 m ermittelt. Von den daraus resultierenden Karten darf demnach keine allzugrosse Genauigkeit erwartet werden, auch wenn diese Karten aus praktischen Gründen, welche mit der Struktur des GIS zusammenhängen, Elementarzellen von 10 m Seitenlänge aufweisen. Die Resultate wurden mit der topographischen Karte verglichen, namentlich die Hangfusszonen. Dabei zeigten sich auch Stellen, welche keinen Sinn ergaben und deshalb weggelassen wurden, welche jedoch auch demonstrierten, dass eine Karte der Infiltrationsverhältnisse nie allein und ohne Überprüfung aus einem digitalen Geländemodell abgeleitet werden sollte.

K - Ausbildung des Karströhrennetzes

Da detaillierte Angaben über Abfluss- und Regenmengen fehlten, waren für die berücksichtigten Quellen auch keine präzisen Aussagen über den Zusammenhang zwischen Regen- und Abflussmenge möglich. Die Methode von Mangin zur Klassifikation von Karstgrundwasserleitern konnte aus diesem Grund nicht angewendet werden. Es wurden keine direkten Anzeichen des Karströhrennetzes (Höhlen, Schächte) beobachtet und es lagen auch keine Angaben aus Bohrkampagnen und geophysikalischen Untersuchungen vor. Ebenso fehlten Langzeitmessungen über die chemisch-physikalischen Charakteristiken der Raisesti- und der Torrent-Quelle.

Das *Kriterium K wurde also global*, d.h. für das gesamte Einzugsgebiet, abgeschätzt und wurde nicht speziell auskartiert. Das Studium von Hydrogrammen und die Auswertung von Markierversuchen veranschaulichten den Karstcharakter des unterirdischen Abflusses.

Die *Analyse der Hydrogramme* der Raisesti-Quelle zeigte, dass der Quellaustritt auf Niederschlagsereignisse mit markanten Spitzen der Abflussganglinie reagiert, welche innert maximal 24 Stunden abflachen. Der abfallende Ast der Hochwasserspitze kann aber durchaus über eine Zeitspanne von länger als 24 Stunden andauern. Diese Quelle ist demnach klar durch ein Karstregime charakterisiert.

Die *chemischen und bakteriologischen Wasseranalysen* der Raisesti-Quelle sind für Aussagen über die Ausbildung des Karströhrensystems zu wenig systematisch (monatliche Wassereprobenahmen, unabhängig von den hydrologischen Verhältnissen). Die einzigen Angaben über den Karstcharakter und den Grad der Entwicklung des Karströhrennetzes der Torrent-Quelle und der Grande- und der Petite Dou-Quelle stammen aus Markierversuchen sowie aus Analysen von Abflussmengen und der Wasserqualität.

Zwischen 1967 und 1994 wurden im Einzugsgebiet der Quellen von St-Imier ca. 18 *Markierversuche* ausgeführt. Nebst der Tatsache, dass sie die Abgrenzung des Einzugsgebietes erlaubten, ergaben sich daraus einige wichtige Erkenntnisse über den Karstcharakter des Wasserabflusses. Auch wenn die Kenntnisse über die hydrologischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Markierversuche z.T. unbekannt oder rudimentär sind, kann folgendes festgehalten werden:

- die maximalen Fliessgeschwindigkeiten der Markierstoffe lagen bei tiefem bis mittlerem Wasserstand zwischen 17 und 76 m/h und gelten damit als hoch.
- die ausgeprägte Spitze der Markierungsmittel-Konzentration (in den Berichten oft nicht oder nur unvollständig dokumentiert) verdeutlicht, dass der grösste Teil des Wassers wahrscheinlich über Karströhren abfließt, was die Kurve des Markierversuches vom 23.7.1985 (Gretillat 1986) im Gebiet der Combes (Region von Les Convers) schön veranschaulicht.

Die Analyse der Markierversuche (Dou- und Torrent-Quellen) sowie die Analysen der Abflussmengen und der Wasserqualität (Raisesti-Quelle) bestätigen den Karstcharakter

des unterirdischen Wasserflusses in Richtung der Quellen von St-Imier. *Als Folge davon wurde dem ganzen Einzugsgebiet der Quellen der Index K_1 zugeteilt.*

Schutzfaktor F

Der Schutzfaktor ist in der Vulnerabilitätskarte (*Figur 18*) dargestellt. Die *Figur 19* zeigt einen vergrösserten Ausschnitt aus dieser Karte. Daraus geht hervor, dass die Schluckstellen mit Schutzfaktoren von 9 die Lokalitäten mit der höchsten Vulnerabilität darstellen. Die bewaldeten Karrenfelder (dabei wurden nur die von Kantonsstrassen durchquerten Gebiete erhoben) sind ebenfalls besonders vulnerabel ($F = 15$), so auch die Dolinen ($F = 16$ bis 20). Die Trockentäler besitzen eine mässige bis hohe Vulnerabilität ($F = 21$ bis 26), deren Schutzfaktor etwa im selben Bereich wie jener der Hangfusszonen liegt. Beide sind generell weniger vulnerabel als die Dolinen und die Karrenfelder. Die höchsten Werte des Schutzfaktors ($F = 26$ bis 29) sind Zonen zugeordnet, in welchen sich die Indizes für mässige Vulnerabilität kumulieren (bei fehlendem Kriterium P_4 kann nicht von einer geringen Vulnerabilität gesprochen werden).

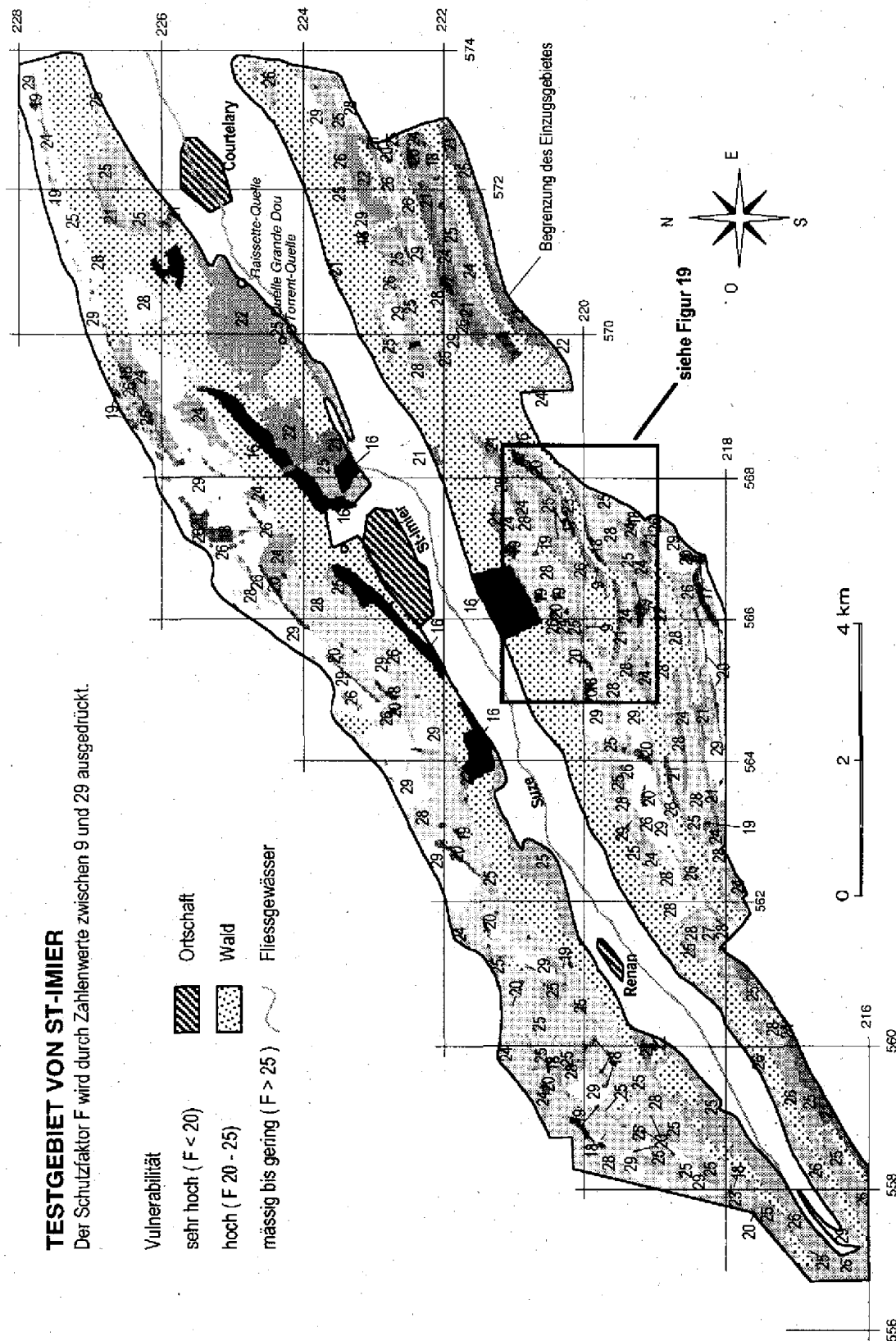
Schutzzonen

Die Schutzzonen wurden auf Grund der Vulnerabilitätskarte (Figuren 18 und 19) und der Beziehung zwischen Schutzfaktor F und den Schutzzonen S_1 , S_2 und S_3 (Tabelle 5) ausgeschieden und sind in den *Figuren 20* und *21* dargestellt. Dabei liegen sowohl die Schluckzonen, die Bäche, welche diese Schluckzonen speisen (Schutzfaktor F von 9 bis 18), als auch die Dolinen, die Karrenfelder und die Cuestas (F zwischen 13 und 19) grösstenteils in der Schutzzone S_1 . Dolinen mit einer mächtigen Bodenschicht (P_3) und ausserhalb des Einzugsgebietes einer Schluckstelle gelegen (L_4), befinden sich in der Schutzzone S_2 . Die Bereiche, für welche die Indexwerte E_2 und/oder I_3 gelten, entsprechen im wesentlichen der Zone S_2 . Gebiete mit niedriger Vulnerabilität und einer beträchtlichen schützenden Deckschicht, welche ausserhalb der Zonen mit konzentrierter Infiltration oder deutlicher Karstmorphologie liegen, werden der Schutzzone S_3 zugeteilt. Da kein Gebiet mit den Eigenschaften von P_4 (mehr als 8 m mächtige Deckschicht mit geringer Wasserdurchlässigkeit) existiert, dehnt sich die Zone S_3 bis zur Begrenzung des Einzugsgebietes aus.

Ausserhalb der Waldgebiete (32 %), welche einfachheitshalber nicht mittels EPIK bearbeitet wurden, deckt die Schutzzone S_1 ca. 1%, die Schutzzone 2 etwa 18 % und die Schutzzone 3 etwa 49 % des kartierten Einzugsgebietes (Berner Teil) von 67 km² ab.

Folgerungen

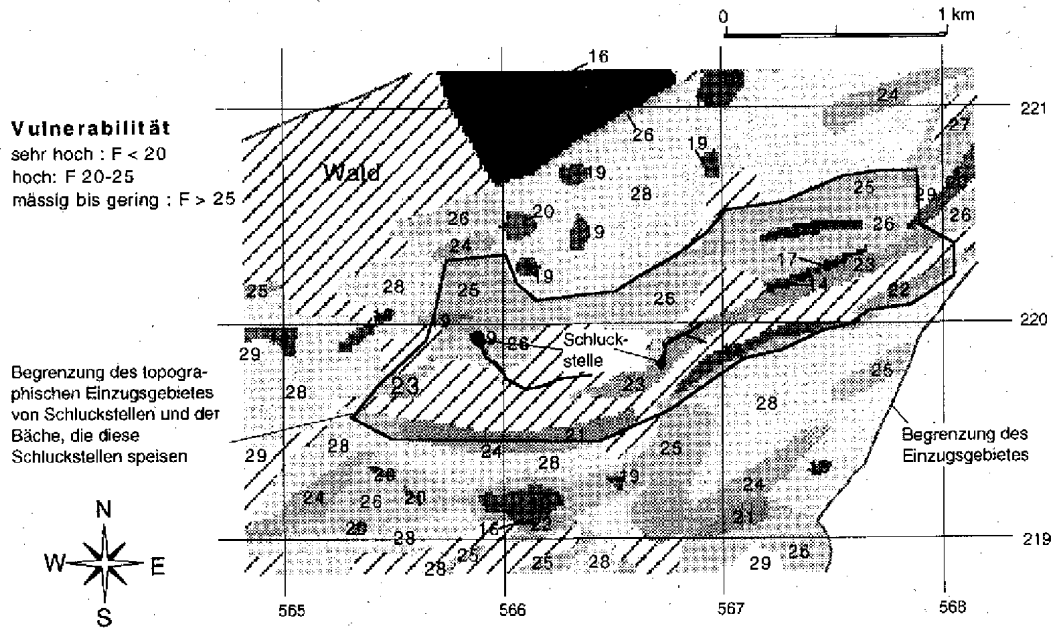
Die Kartierung der vier indizierten Kriterien erlaubte das Erstellen einer *Vulnerabilitätskarte* (Figur 18), wobei der Schutzfaktor F zwischen 9 und 29 variiert. Die Beziehung zwischen den Schutzfaktoren F und den Schutzzonen S (Tabelle 5) erlaubte die *Ausscheidung neuer Schutzzonen S_1 , S_2 und S_3* (Figur 21). Ein Vergleich der alten und der neuen Schutzzonen zeigt, dass die Fläche der den Schutzzonen S_1 und S_2 zugeordneten Areale mit der EPIK-Methode deutlich zugenommen hat, und dass diese Schutzzonen über das gesamte Einzugsgebiet verteilt sind. Diese Zonen beschränken sich allerdings auf die besonders vulnerablen Stellen. Die neue Schutzzonenausscheidung mittels einer differenzierten Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse behindert die Raumnutzung nicht auf unnötige Weise.



Figur 18. Vulnerabilitätskarte des im Kanton Bern liegenden Teils des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier (BE). Die Raster sind schwarz bis dunkelgrau für $F < 20$, mittelgrau für $F = 20 - 25$, und hellgrau bis weiss für $F > 25$.

TESTGEBIET VON ST-IMIER

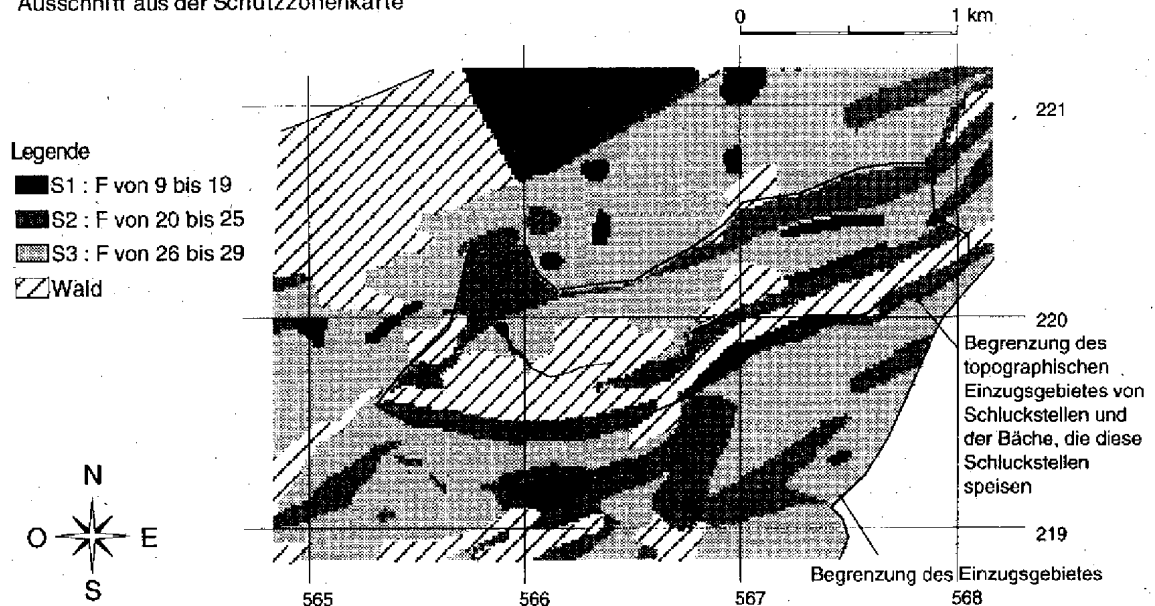
Ausschnitt aus der Vulnerabilitätskarte (F-Werte)



Figur 19. Detail aus der Vulnerabilitätskarte des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier (BE). Die Raster sind schwarz bis dunkelgrau für $F < 20$, mittelgrau für $F = 20-25$, und hellgrau bis weiss für $F > 25$.

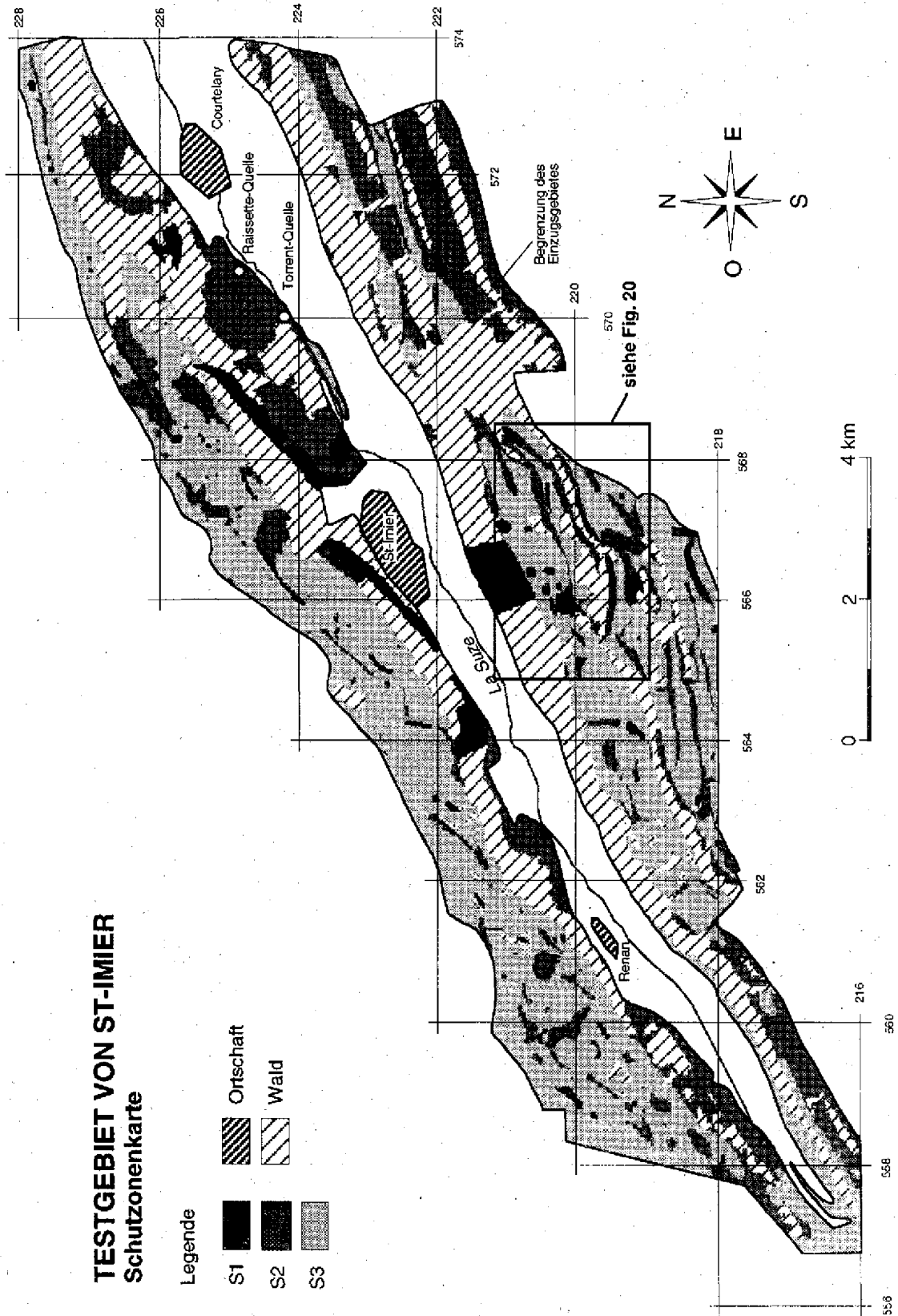
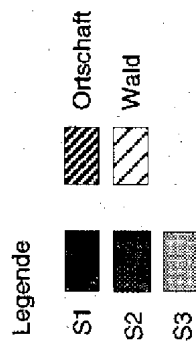
TESTGEBIET VON ST-IMIER

Ausschnitt aus der Schutzzonenkarte



Figur 20. Detail der Schutzzonenkarte für die Quellen von St-Imier (BE).

TESTGEBIET VON ST-IMIER Schutzonenkarte



Figur 21. Schutzonenkarte des bernischen Teils des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier (BE).

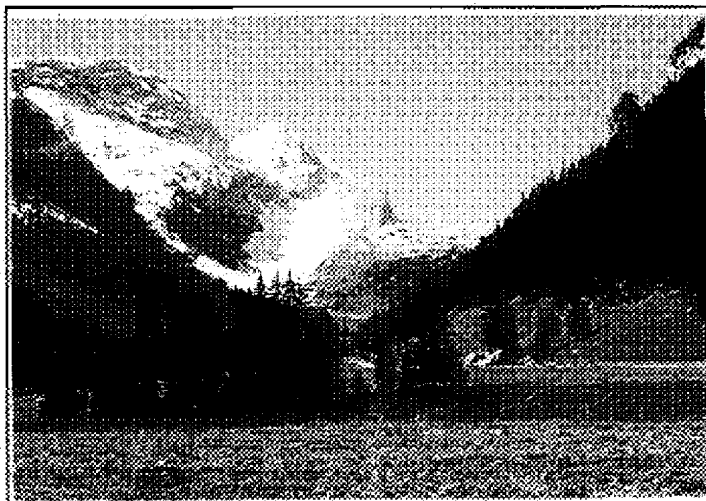
4.2 Einzugsgebiet der Blattiquellen in der Lenk/BE

Einführung

Die Blattiquellen (alte und neue, Koordinaten 599'935 / 141'240) dienen der Trinkwasserversorgung der Gemeinde Lenk (Kanton Bern). Die alte Quelle (natürlicher Quellaustritt) wurde bis 1963 genutzt. Die neue, 10 m tiefer liegende wurde zur Sicherstellung einer ausreichenden Fassungsmenge gebaut. Ihr Einzugsgebiet befindet sich in den Helvetischen Kalkalpen zwischen 1200 und 3200 m ü. M. Im folgenden wird auf den quellfernen Bereich beidseitig des Iffigensees eingegangen, der zwischen der Nordflanke des Mittagshorns und dem Niesenhorn liegt (*Figuren 22 und 23*).

Das Einzugsgebiet beinhaltet Teile der stark verfalteten Wildhorndecke, deren Faltenachsen WSW-ENE streichen (Wildberger 1981). Die Front der Helvetischen Decken wird in diesem Bereich von ultrahelvetischen Schuppen bedeckt, in welchen in verschiedenen tektonischen Fenstern die helvetische Unterlage freiliegt, wie beispielsweise im Fenster von Schwand mit den Blattiquellen.

Im Einzugsgebiet der Quellen setzt sich die Wildhorndecke aus einer Abfolge zusammen, die von der Unterkreide (Palfrismergel) bis ins Paleogen (Globigerinenschiefer) reicht. Eine Karstwasserzirkulation tritt vor allem im Schrattenkalk (Urgonien) und in Richtung der Synklinalachsen auf. Die Kalke des Neocom (Valanginien - Hauterivien) und des Paleogen (Hohgantschichten, Nummulitenkalke und -sandsteine) sowie die mergeligen Kalke der Drusbergschichten sind zwar ebenfalls verkarstet, jedoch weniger stark. Die Globigerinenschiefer und die ultrahelvetischen Gesteine (Flysch) sind nicht oder nur sehr lokal verkarstet (Wildberger 1984).

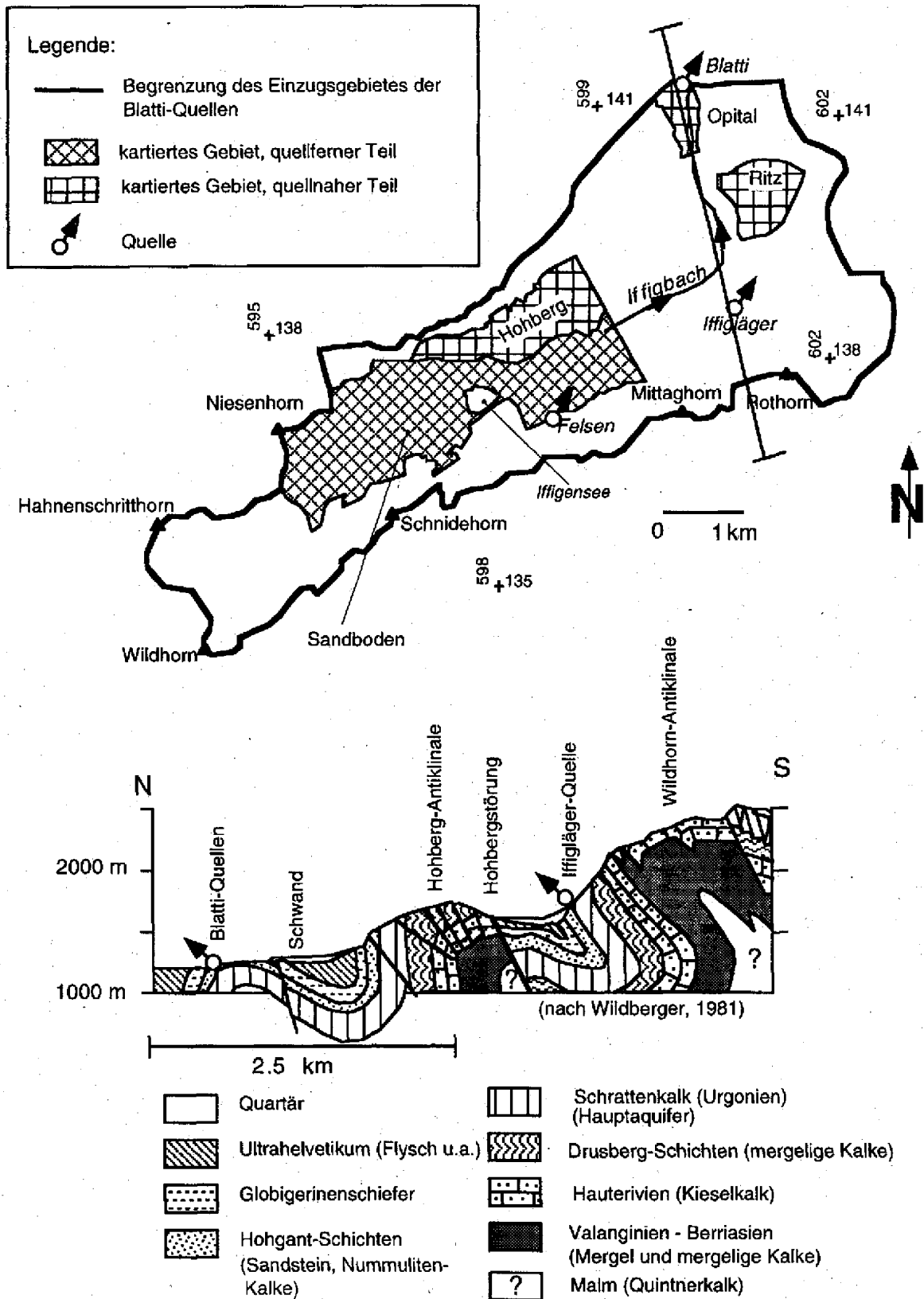


Figur 22. Iffigtal, Blick von Iffigläger in Richtung Südwesten; im Hintergrund das Schnidehorn, zwischen den Flanken des Mittagshorns und des Hohbergs. (Foto A. Wildberger)

Sowohl die Dissertation von Wildberger (1981) über die Karsthydrogeologie des Rawilgebietes als auch die Berichte über die Sondierschächte, welche im Zusammenhang mit der Ausscheidung der Schutzzonen (Kellerhals + Haefeli AG 1988) für die Blattiquelle im tektonischen Fenster von Schwand (Antiklinale) ausgeführt wurden, lieferten wichtige Angaben für die Charakterisierung der verschiedenen Vulnerabilitäts-Kriterien. Für die Bestimmung der Kriterien E, P, I und K im Untersuchungsgebiet

wurde auf eine Differenzierung der geologischen Formationen (Abfolge: Kalke des Hauterivien bis eocäne Hohgant-Schichten) verzichtet und die Gesamtheit aller Felsaufschlüsse auf globale Weise berücksichtigt.

Das Kartenblatt Lenk des geologischen Atlas der Schweiz im Massstab 1:25'000 (Badoux et al. 1962) mit den dazugehörigen Erläuterungen (Badoux & Lombard 1962) und die hydrogeologische Karte des Rawilgebietes (Wildberger 1981) dienten als Grundlagendokumente für die vorliegende Studie. Die Feldaufnahmen für die Bestimmung der Kriterien E, P, I und K wurden auf einer topographischen Grundlage im Massstab 1:10'000 ausgeführt.

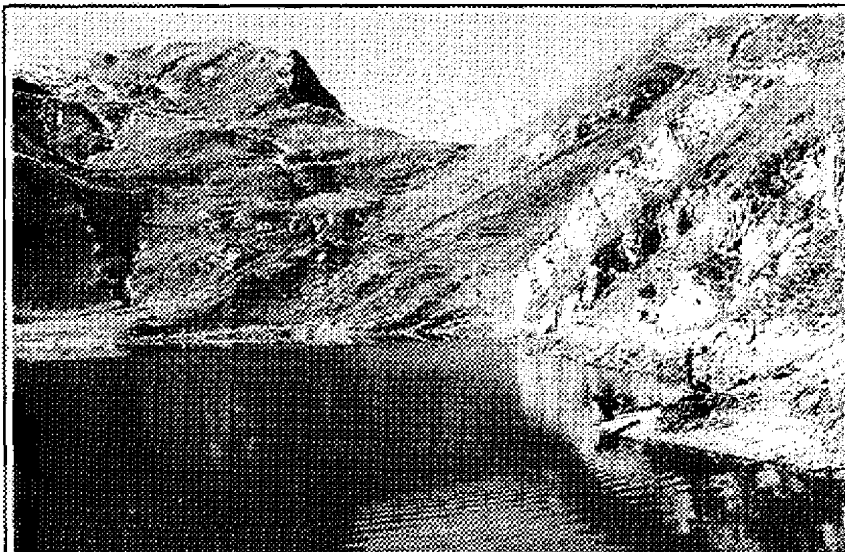


Figur 23. Geographische Situation des Einzugsgebietes der Blattiquellen (Lenk/BE) und dazugehöriger geologischer Schnitt.

E - Epikarst (Anhang 4)

Für das Einzugsgebiet der Blattquellen im Gebiet von Lenk wurde dieses Kriterium anhand von Luftfotos, der topographischen Karte 1:10'000 und einer Überprüfung im Feld bestimmt.

Den Kalkaufschlüssen, welche Anzeichen von Verkarstung zeigten (Karrenfelder, erweiterte Klüfte) sowie dem Iffigensee (*Figur 24*) wurde der Index E_1 zugeteilt. Der Index E_2 wurde nur auf das Gebiet einer kleinen Mulde mit klüftigem Fels unter geringer Bodenbedeckung östlich des Iffigensees angewendet. Dem Rest, d.h. dem weitaus grössten Teil des Einzugsgebietes, wurde der Index E_3 zugeteilt, da dort keine Karstmorphologie nachweisbar war.



Figur 24. Iffigensee, Blick gegen Nordwesten. Das Karstnetz und der Epikarst sind mässig entwickelt. Der Schutz durch die Deckschicht ist gering, ausser links auf der Terrasse in mittlerer Höhe (P_3) und am Seeufer (P_2). (Foto A. Wildberger)

P - Schutzwirkung durch die Deckschicht (Protektion) (Anhang 5)

Die schützende Deckschicht setzt sich aus dem eigentlichen Boden (Mächtigkeit zwischen 0 und ca. 40 cm) und aus quartären Ablagerungen (Moräne, Hangschutt) mit Mächtigkeiten von mehr als 2.5 m zusammen.

Die Bestimmung des Kriteriums P wurde unter Verwendung von Luftfotos und der geologischen Karte bewerkstelligt und im Feld visuell und mit Handbohrungen überprüft. Letztere sind für diesen Typ von Deckschicht nicht sonderlich geeignet, da die Mächtigkeit des Bodens selten 20 cm überschreitet und die darunterliegenden, heterogenen Moränenablagerungen kaum durchdringbar sind.

In der untersuchten Region (Mittaghorn - Niesenhorn) sind grosse Gebiete nur mit einer relativ dünnen Deckschicht bedeckt (P_1 und P_2). Die oft über 1 m mächtigen und als wenig durchlässig geltenden Hangschuttzonen können mit dem Kriterium P_3 charakterisiert werden. Dem Gebiet Sandboden, in welchem mehrere Meter mächtige quartäre Ablagerungen mit geringer Wasserdurchlässigkeit liegen und welches zeitweilig überschwemmt ist, wurde der Index P_4 zugeteilt.

I - Infiltrationsbedingungen (Anhang 6)

Die Infiltrationsbedingungen wurden anhand der topographischen Karte und einer punktuellen Überprüfung im Feld bestimmt. Gebiete mit Hangneigungen von über 25 % sowie Hangfusszonen ausserhalb der Einzugsgebiete von Schwinden und Oberflächengewässern, wurden im Massstab 1 : 10'000 von Hand auskartiert. Diese Zonen belegen einen Streifen von 50 m beidseits der Linie, welche die Grenze zu grösserem Hanggefälle, d.h. 10 respektive 25 % je nach Art der Vegetation, markiert (Figur 11).

Vom Untersuchungsgebiet war kein digitales Geländemodell verfügbar. Für eine bescheidene Fläche wie diese ist der Arbeitsaufwand für eine manuelle Bearbeitung jedoch vertretbar. Hangfusszonen können mittels geographischem Informationssystem rasch ermittelt, die Resultate müssen jedoch – da direkt am Bildschirm gearbeitet wird – lokal verifiziert werden.

Der grösste Teil des Untersuchungsgebietes wird mit dem Wert von I_4 charakterisiert. Drei Schluckstellen sowie auch jene des Iffigensees wurden als I_1 klassiert. Die berg- und talseitig des Sees gelegenen Gebiete mit temporärem oder permanentem Oberflächenabfluss sind durch die Indexwerte I_2 und I_3 charakterisiert.

K - Ausbildung des Karströhrennetzes (Anhang 7)

Die Blattiquellen befinden sich im talseitigen Teil des tektonischen Fensters von Schwand. Sie entspringen dort Kalken der Hohgant-Formation, nachdem das Wasser aus dem Schrattenkalk aufgestiegen ist. Die alte Quelle (kleine Höhle innerhalb der stark verkarsteten Nummuliten-Kalke) wurde von der Gemeinde Lenk bis ins Jahr 1963 genutzt. Um auch in Trockenzeiten genügend Wasser fördern zu können, wurde 10 m unterhalb des natürlichen Quellaustritts der alten Quelle die neue Blattiquelle gefasst. Die mittlere jährliche Schüttung dieses Austrittes schwankt zwischen 6'000 und 9'000 l/min.

Die Blattiquellen bilden den basalen Austritt des komplexen Karstsystems im Einzugsgebiet des Iffigbachs, die Felsen- und die Iffiglägerquelle im Iffigtal stellen Überlaufquellen des höher liegenden Teils des Systems dar. Es lassen sich zwei Hauptbereiche unterscheiden: der quellnahe Bereich mit der Austrittsstelle der Blattiquellen und der Antiklinalzone des Hohberg nördlich der Hohbergstörung sowie das quellferne Teilgebiet mit dem Einzugsgebiet der Felsen- und der Iffiglägerquelle. Dieses quellferne Teil-einzugsgebiet, welches die Gipfel des Niesenhorns und des Hahnenschritthorns beinhaltet, liegt zur Hauptsache westlich und südwestlich des Iffigensees.

Die Hydrogramme der Blattiquellen (Nabholz & Häberli 1972-1979) zeigen ein ähnliches Verhalten der beiden Quellen. Die neue, tieferliegende Fassung liefert den Basisabfluss des Quellsystems und weist geringe Schwankungen auf. Die alte Quelle tritt aus einer natürlichen Höhle aus, welche auf ein gut entwickeltes Karströhrennetz hinweist. Aus einem Markiersuch mit Farbstoffeingabe in ein Schluckloch des Iffigensees konnten mittlere Abstandsgeschwindigkeiten von rund 100 m/h ermittelt werden. Solch hohe Geschwindigkeiten belegen ein gut entwickeltes Karströhrennetz.

Der quellferne Teil des Einzugsgebietes wird zur Hauptsache durch die Felsen- und die Iffiglägerquelle drainiert. Beide Quellen zeigen typische Merkmale von Karstquellen eines gut entwickelten Karströhrennetzes. Indessen fliesst ein Teil des im höher liegenden Bereich infiltrierten Wassers direkt in den Kalken des Hauterivien und Urgonien in Richtung der Blattiquelle (hydraulische Verbindung durch Markiersuch nachgewiesen, Wildberger 1981). Auf dem Weg zu den Quellen muss das Wasser über tektonische

Flächen die wenig durchlässigen Drusberg-Schichten (mergelige Kalke) und die Kieselkalke des Hauterivien durchfliessen. Da diese Schichten eine geringere Wasserdurchlässigkeit als die verkarsteten Schrättalkalke besitzen, wurde für den quellfernen Teil des Einzugsgebietes der Blattiquellen der Indexwert K₂ und für den quellnahen Teil, darin eingeschlossen die nördlich der Hohbergstörung gelegene Hohberg-Antiklinale, der Indexwert K₁ verwendet (Doerfliger 1996 b).

Schutzfaktor F

In der Vulnerabilitätskarte (*Figur 25*) schwankt der Schutzfaktor F zwischen 11 und 32. Ausserhalb der Schluckstellen des Iffigensees bilden die nördlich und östlich des Iffigensees gelegenen Karrengebiete die grössten zusammenhängenden Flächen mit einer erhöhten Vulnerabilität (Schutzfaktor 14 und 18).

Felsaufschlüsse mit Karstphänomenen oder verstärkter Klüftung, in welchen eine flächenhafte Infiltration stattfindet (zwischen Sandboden und Niesenhorn), bilden grossflächige Bereiche mit erhöhter Vulnerabilität (Schutzfaktor 20). Die Werte für die Schutzfaktoren im Bereich der Hohbergstörung liegen zwischen 21 und 23 und stellen eine hohe Vulnerabilität dar.

Der am besten geschützte Bereich ist jener vom Sandboden. Ihm wurde der Indexwert P₄ zugeteilt (schützende Deckschicht). Der Wert des Schutzfaktors beträgt dort 32. Einige Gebiete S und SE des kartierten Bereichs sind ebenfalls sehr gut geschützt (F = 31).

Schutzzonen

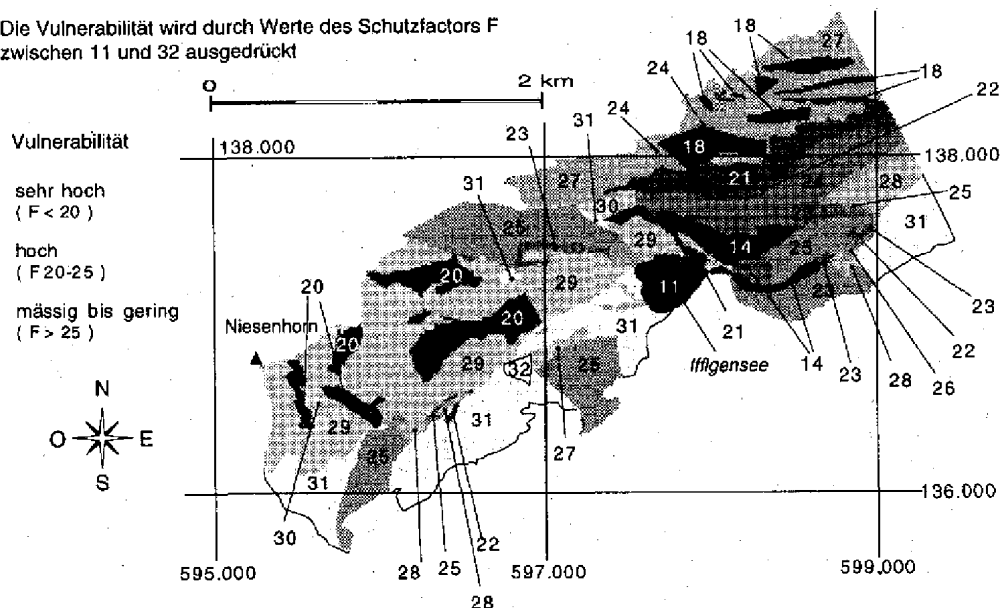
Gemäss Tabelle 5 ergeben sich aus der Vulnerabilitätskarte folgende Schutzzonen (*Figur 26*):

Die *Schutzzonen S1* beschränken sich auf den NE-Teil des Untersuchungsgebietes und beinhalten den Iffigensee mit seinen Schluckstellen und Karrenfeldern, die Aufschlüsse direkt im E und NE des Sees, sowie die sich nördlich der Hohbergstörung auf der Hohbergantiklinalen erstreckenden Karrenfelder. Auf letzteren Bereich wurde der Indexwert K₁ angewendet, da er wegen der antiklinalen Position der Kalksteinschichten ein bevorzugtes Nährgebiet des Karstaquifers darstellt, der die Blattiquelle speist.

Die *Schutzzonen S2* liegen im Zentrum des Einzugsgebietes und beinhalten hauptsächlich das Einzugsgebiet des Baches, der den ca. 300 m nördlich des Sees gelegenen, E-W-orientierten und durch Hangschutt begrenzten Graben des Hohbergtälis durchfliesst. Dieser Bach fliesst auf quartären Ablagerungen, in welchen er versickert. Etwa 2 km talwärts (etwa 1 km talwärts des kartierten Gebietes) tritt er an einigen Stellen wieder aus und fliesst dort in den Iffigbach. Der Iffigbach seinerseits versickert im Bereich der Blattiquellen und kann diesen bis zu 0.5% (< 1%) der gesamten Abflussmenge beisteuern. Angesichts dieses geringen Bachwasseranteils, dessen starke Verdünnung durch das Grundwasser, welches die Blattiquellen speist und unter Berücksichtigung der in bakteriologischer Hinsicht guten Wasserqualität der Blattiquellen scheint es vielleicht übertrieben, diese Zone im Hohbergtälis gemäss unserem Vorschlag in die Schutzzone S2 zu stellen. In einer solchen Situation muss der Entscheid zwischen der Fachbehörde und dem beauftragten Geologen abgesprochen werden.

TESTGEBIET VON LENK (Bereich Iffigensee - Niesenhorn)

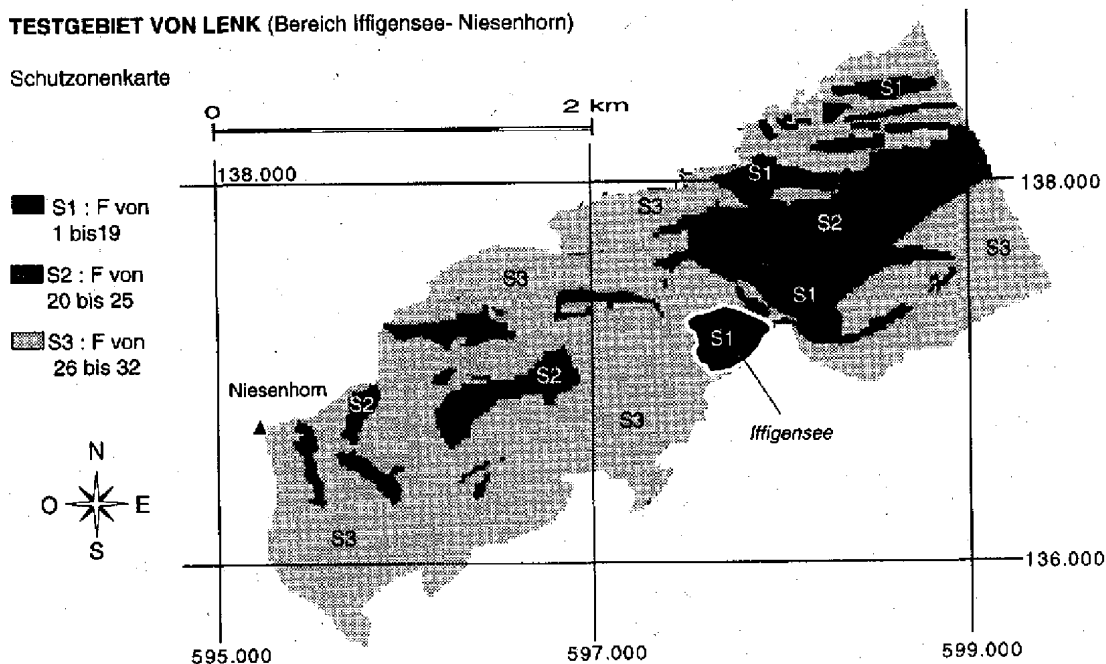
Die Vulnerabilität wird durch Werte des Schutzfactors F zwischen 11 und 32 ausgedrückt



Figur 25. Vulnerabilitätskarte des quellfernen Bereichs des Einzugsgebietes der Blat-tiquellen (Lenk/BE). Die Raster sind schwarz bis dunkelgrau für $F < 20$, mittelgrau für $F=20-25$ und hellgrau bis weiss für $F > 25$.

TESTGEBIET VON LENK (Bereich Iffigensee- Niesenhorn)

Schutzonenkarte



Figur 26. Schutzonenkarte des quellfernen Bereichs des Einzugsgebietes der Blat-tiquellen (Lenk/BE).

Im Bereich mit dem Indexwert K_2 (südlicher Teil des quellfernen Einzugsgebietes) belegt die Zone S2 verschiedene Teilgebiete, die auch die Kriterien E_1 , P_1 , I_2 oder I_4 erfüllen.

Die Zone S3 erstreckt sich bis an den Rand des Einzugsgebietes. Obwohl die Lokalität Sandboden durch den Indexwert P_4 und eine geringe Vulnerabilität charakterisiert wird, wurde sie wegen ihrer geringen Ausdehnung und ihrer Lage im Herzen des Einzugsgebietes ebenfalls in die Zone S3 gestellt.

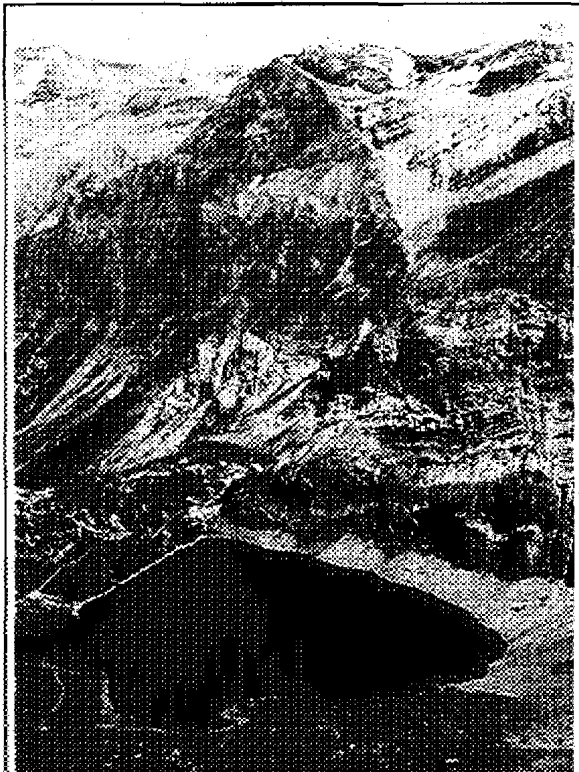
Folgerungen

Das Einzugsgebiet der Blattiquellen liegt in einem alpinen Karstgebiet (*Figur 27*). Es besitzt einen tektonisch komplexen Aufbau. Aus diesem Grund war es notwendig Teilgebiete mit unterschiedlichen Indexwerten für das Kriterium K zu bestimmen.

In diesem alpinen Gebiet übernehmen die Quartärablagerungen die Funktion der schützenden Deckschicht. Die eigentlichen Böden sind sehr dünn und spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Das Gewässernetz an der Terrainoberfläche und die Existenz von Porengrundwasserleitern, welche den Karst bedecken, stellt in diesem Gebiet eine Besonderheit dar. Das Wasser dieser Grundwasserleiter exfiltriert einerseits flächenhaft in den Iffigensee, der durch verschiedene Schluckstellen in den verkarsteten Untergrund entwässert, und andererseits in den Iffigbach, der teilweise in den Karstgrundwasserleiter nahe der Blattiquellen versickert.

Die Schutzzonen S1 sind an morphologisch gut sichtbare Stellen gebunden, welche durch Einzäunung geschützt werden sollten. Die Schutzzonen S2 decken ungefähr 20 % des kartierten Gebietes ab. Sie liegen im Bereich von Karrenfeldern und Cuestas, an Stellen mit fehlender Bedeckung oder in Bereichen mit den in I_2 genannten Infiltrationsverhältnissen (steile Einzugsgebiete von Bächen).



Figur 27. Der Iffigensee vom Ausläufer des Niesenhorns aus gesehen. Im Zentrum das Mittaghorn, unten links der Beginn des Iffigtals. (Foto A. Wildberger)

4.3 Finanzielle Aspekte

Mit den beiden Fallbeispielen konnte die Anwendbarkeit der EPIK-Methode für die Ausscheidung von Schutzzonen in Karstgebieten gezeigt werden. Die Methode erlaubt auf differenzierte Weise und auf der Grundlage klarer Kriterien, Zonen unterschiedlicher Vulnerabilität zu ermitteln.

Die **Tabelle 6** gibt eine Übersicht über die Anzahl der aufgewendeten Stunden für die Bestimmung der verschiedenen Kriterien. Darin werden die regionalen Methoden (Büroarbeit auf der Grundlage von Synthesedokumenten) von den lokalen Methoden (Detailstudien, insbesondere im Feld) unterschieden. Daraus wird ersichtlich, dass mit der Grösse des untersuchten Gebietes der Zeitaufwand pro km² abnimmt (total 2.1 Stunden pro km² für St-Imier und 5.5 Stunden pro km² für Lenk). In den Zahlen der Tabelle 6 ist der Zeitaufwand für die Digitalisierung und die Weiterbearbeitung von Angaben mit dem GIS nicht berücksichtigt. Am Beispiel von St-Imier (70 km²) wurden für diese Arbeit (Digitalisierung der Daten, Zuweisung der Gewichtungskoeffizienten, Erstellen und Ausdruck von Karten) 6 Tage benötigt, d.h. 0.7 Std./km². Für das Beispiel der Lenk (8 km²) wurden dafür im Minimum 4 Tage benötigt, d.h. mehr als 4.2 Std./km². Daraus wird ersichtlich, dass für die digitale und graphische Verarbeitung von Daten - unabhängig von der zu behandelnden Fläche - einige Tage Arbeit eingerechnet werden müssen.

Tabelle 6. Anzahl aufgewendeter Stunden pro km² für die Bewertung der 4 Kriterien der EPIK-Methode (regionale Methoden: Büroarbeit ohne Aufwand für Digitalisierung und GIS-Bearbeitung; lokale Methoden: Feldarbeit, Detailstudien).

Kriterium	E		P		I		K	
	Regionale Methoden	Lokale Methoden	Regionale Methoden	Lokale Methoden	Regionale Methoden	Lokale Methoden	Regionale Methoden	Lokale Methoden
St-Imier	0.4	0.1	0.1	0.7	0.1	0.5	0.15	0.05
Total	0.5		0.8		0.6		0.2	
Lenk	0.5	3	-	1.0	0.5	-	0.4	0.1
Total	3.5		1.0		0.5		0.5	

Die in Tabelle 6 angegebenen Zeitaufwendungen sind dann repräsentativ, wenn ein Minimum an geologischen und hydrogeologischen Kenntnissen vorhanden ist. Für die präsentierten Fallbeispiele waren bereits Schutzzonen ausgeschieden worden. Das Einzugsgebiet wurde mit Hilfe bereits vorhandener geologischer und hydrogeologischer Angaben (Markierversuche) abgegrenzt, d.h. es wurden keine neuen Markierversuche durchgeführt. In beiden Fällen waren Hydrogramme der Quellen, jedoch weder pedologische Karten, noch diesbezügliche Angaben aus Bohrungen oder Grabungen verfügbar.

5 FOLGERUNGEN UND AUSSICHTEN

Die vier Kriterien "Entwicklung des Epikarsts", "Schutzwirkung der Deckschicht", "Infiltrationsbedingungen" und "Entwicklung des Karstnetzes" erlauben das Erstellen von Karten, welche die Vulnerabilität von Fassungen in Karstgebieten darstellen. Diese Vulnerabilitätskarten bilden die Grundlage für die Ausscheidung von Schutzzonen in Karstgebieten. **Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit sollten die ermittelten Werte der Kriterien E, P, I und K unbedingt im hydrogeologischen Expertenbericht enthalten sein.** Die Anwendung dieser Methode in verschiedenen Testgebieten, deren zwei oben vorgestellt wurden, zeigen die Durchführbarkeit dieses neuen Ansatzes. Die EPIK-Methode wurde in verschiedenen Karsttypen - wie dem Falten- und Tafeljura, den Préalpes médianes und den Kalkalpen - getestet. Die erhaltenen Resultate zeigen **eine allgemeine Anwendbarkeit der Methode für die Verhältnisse in der Schweiz.**

Die Verwendung eines Geographischen Informationssystems (GIS) für das Studium der verschiedenen Testgebiete, z.B. jenem von St-Imier, erlaubte die Kalibrierung der verschiedenen quantitativen Aspekte der Methode und die Durchführung der notwendigen Empfindlichkeitstests. Ebenso war es mit diesem Werkzeug möglich, die Karte mit der Verteilung des Schutzfaktors F (Vulnerabilitätskarte) mit einem stark reduzierten Aufwand zu erhalten. Der Gebrauch eines GIS ist nicht zwingend, aber er kann - je nach Grösse des Einzugsgebietes - die Arbeit stark vereinfachen.

Verunreinigungen von Karstgrundwasserleitern sind vermeidbar. Die Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen mit den entsprechenden Nutzungsrestriktionen, welche den hydrogeologischen Eigenschaften des Karstes Rechnung trägt, kann das Risiko einer Verschmutzung stark reduzieren. Unter Berücksichtigung des meist lokalen Charakters des Gefährdungspotentials innerhalb des Einzugsgebietes von Quellen (Strassen- und Eisenbahnverbindungen, Deponien, Steinbrüche, Bauernhöfe mit Jauchegruben oder Silos, Garagen etc.), erlaubt die EPIK-Methode, welche auf spezifischen hydrogeologischen Kriterien beruht, in Zukunft einen besseren Schutz von Quellen und Fassungen in Karstgebieten.

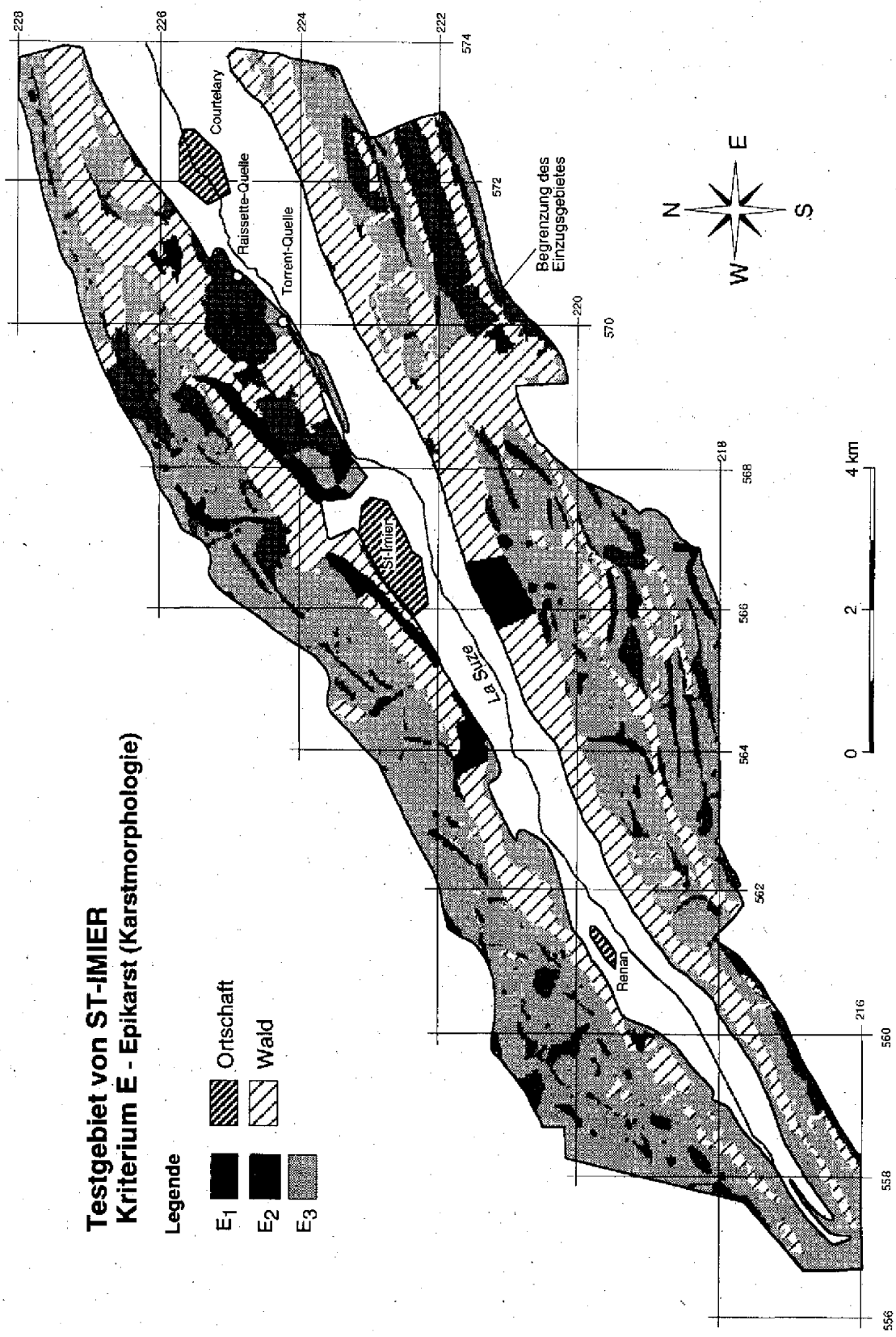


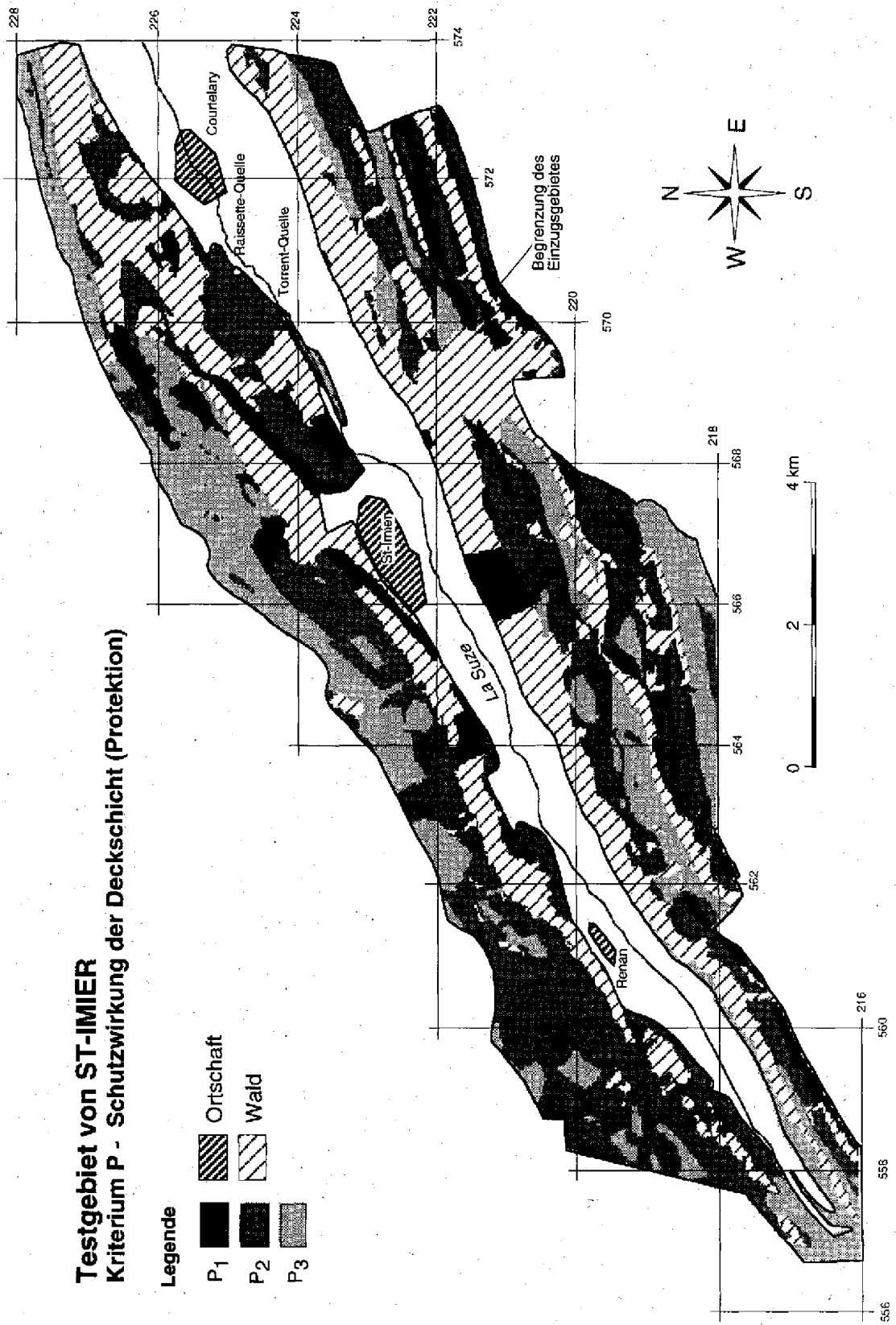
Sibe Brünne genannte Quelle der Simme, Lenk BE. (Foto A. Wildberger)

6 ANHÄNGE

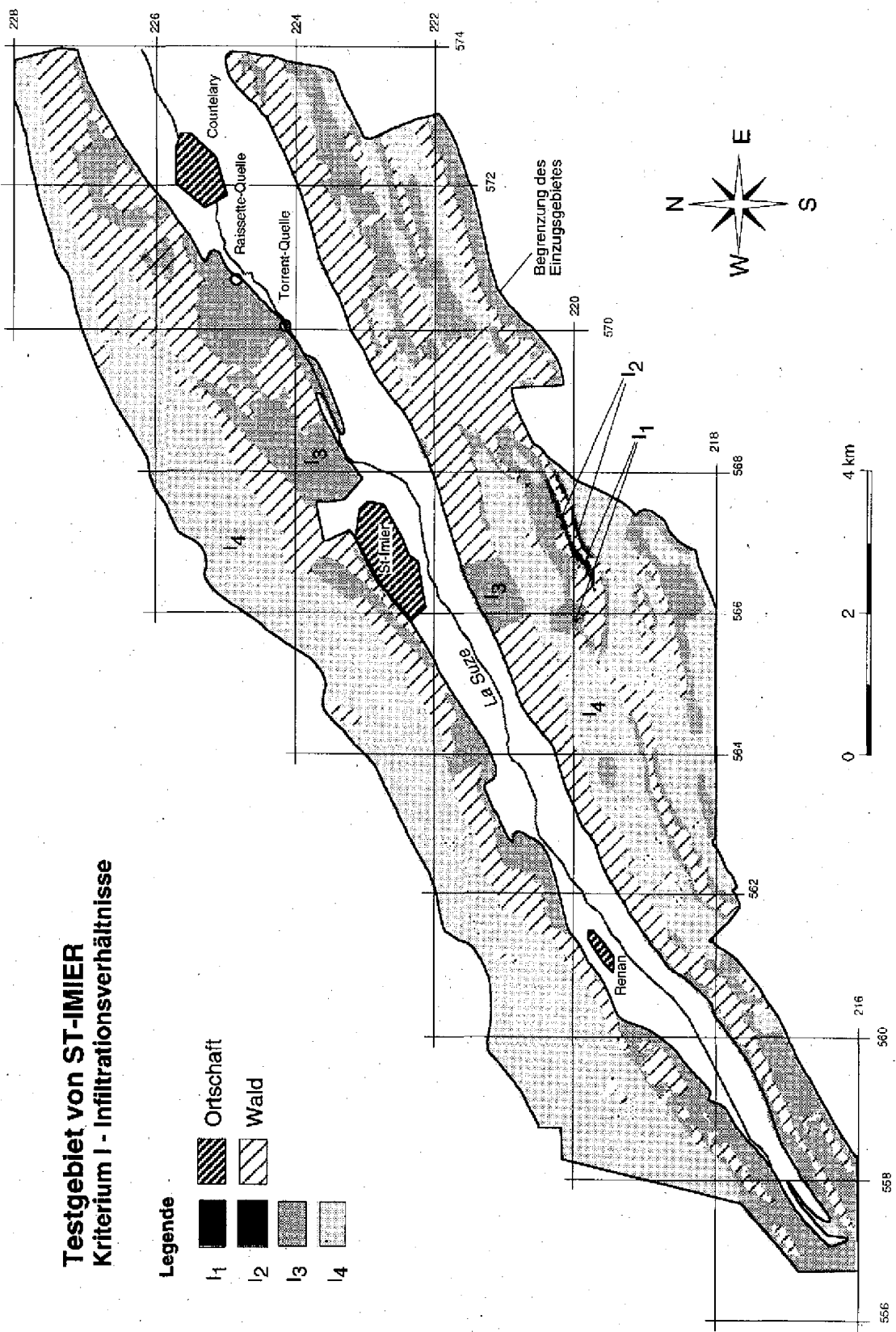
- Anhang 1 Karte der Verteilung des Epikarsts (Karstmorphologie) im bernischen Teil des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier.
- Anhang 2 Karte der Verteilung der schützenden Deckschicht im bernischen Teil des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier.
- Anhang 3 Karte der Infiltrationsverhältnisse im bernischen Teil des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier.
- Anhang 4 Karte der Verteilung des Epikarsts (Karstmorphologie) im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattiquellen in Lenk (BE).
- Anhang 5 Karte der Verteilung der schützenden Deckschicht im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattiquellen in Lenk (BE).
- Anhang 6 Karte der Infiltrationsverhältnisse im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattiquellen in Lenk (BE).
- Anhang 7 Karte mit Angabe der Entwicklung des Karströhrennetzes im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattiquellen in Lenk (BE).

Anhang I. Karte der Verteilung des Epikarsts (Karstmorphologie) im bernischen Teil des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier.





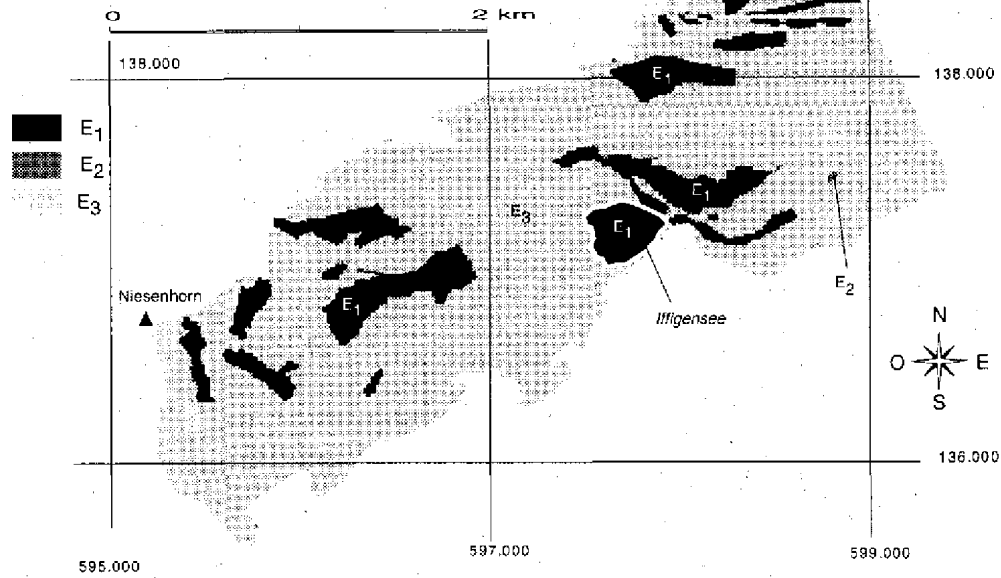
Anhang 3. Karte der Infiltrationsverhältnisse im bernischen Teil des Einzugsgebietes der Quellen von St-Imier



Anhang 4. Karte der Verteilung des Epikarsts (Karstmorphologie) im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattquellen in Lenk (BE).

Testgebiet von LENK (Bereich Iffigensee - Niesenhorn)

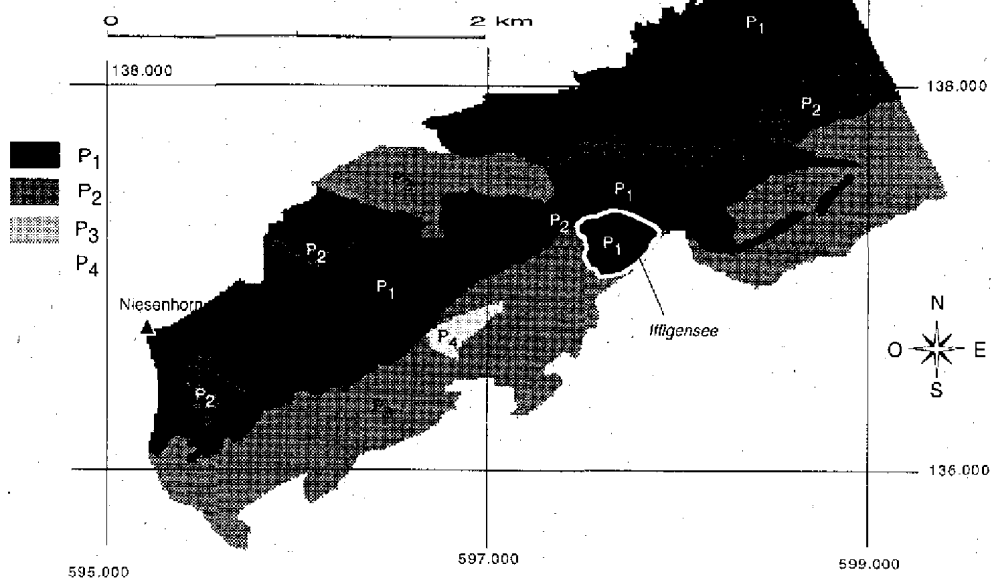
Kriterium E - Epikarst (Karstmorphologie)



Anhang 5. Karte der Verteilung der schützenden Deckschicht im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattquellen in Lenk (BE).

Testgebiet von LENK (Bereich Iffigensee - Niesenhorn)

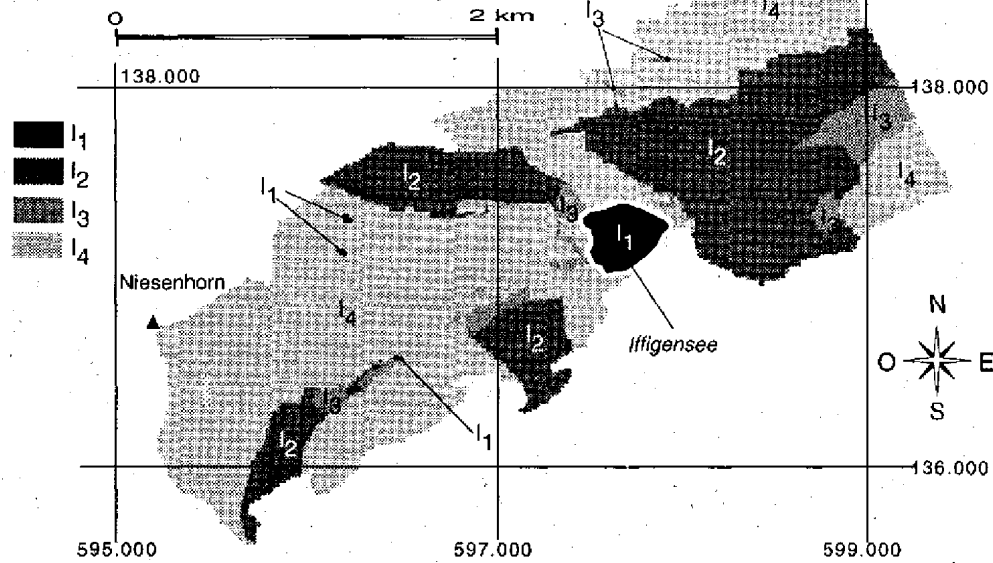
Kriterium P - Schutzwirkung der Deckschicht (Protektion)



Anhang 6. Karte der Infiltrationsverhältnisse im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattquellen in Lenk (BE).

Testgebiet von LENK (Bereich Iffigensee - Niesenhorn)

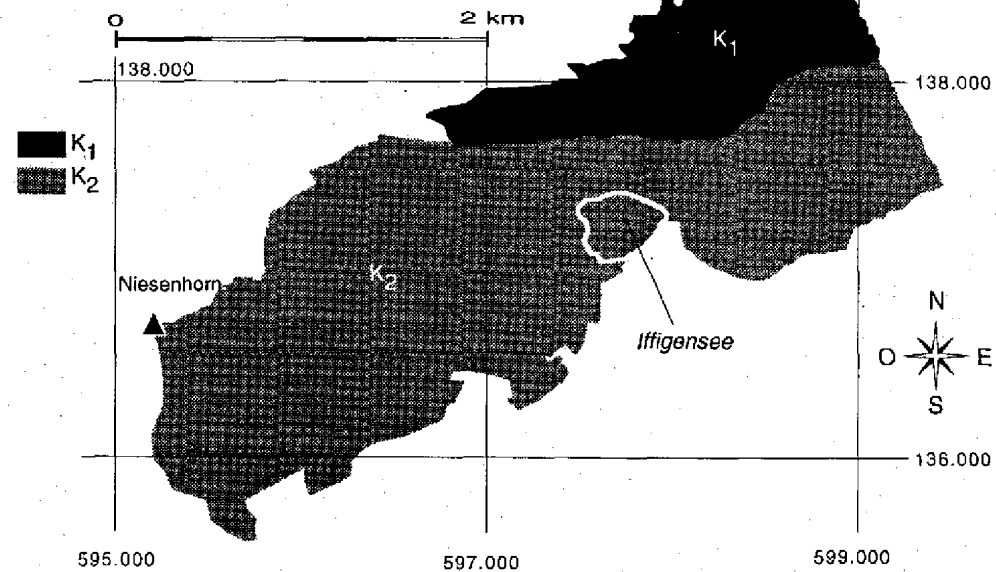
Kriterium I - Infiltrationsverhältnisse



Anhang 7. Karte mit Angabe der Entwicklung des Karströhrennetzes im quellfernen Bereich des Einzugsgebietes der Blattquellen in Lenk (BE).

Testgebiet von LENK (Bereich Iffigensee - Niesenhorn)

Kriterium K - Entwicklung des Karstnetzes



7 BIBLIOGRAPHIE

Badoux, H., Gagnebin, E., Lombard, A., McConnell, R.B., de Raaf, M., Schaub, H.P. & Vischer, A. 1962: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 41 – Lenk. Schweizerische Geologische Kommission.

Badoux, H. & Lombard, A. 1962: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 41 – Lenk, notice explicative. Schweizerische Geologische Kommission.

Bonacci, O. 1987: Karst Hydrology, with special reference to the Dinaric Karst. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 184 p.

BUS (Bundesamt für Umweltschutz) 1982: Wegleitung zur Ausscheidung von Gewässerschutzbereichen, Grundwasserschutzzonen und Grundwasserschutzarealen; Bundesamt für Umweltschutz, 1977, teilrevidierte Auflage 1982.

Dodge, M. 1982: Structure, fonctionnement hydrodynamique et vulnérabilité des aquifères karstiques. In: Journée d'étude sur la protection des eaux karstiques, Bruxelles, 29. Nov. 1982. - Soc. nationales des distributions d'eau et comm. de protection des sites spéléologiques: 42-46.

Doerfliger, N. 1996 a: Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method). Thèse, Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel.

- 1996 b: Cartographie de la vulnérabilité selon la méthode EPIK dans le bassin d'alimentation des sources de La Lenk (BE). Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne, 20 p., unveröffentlicht.

Doerfliger, N. & Tâche, E. 1995: Vulnérabilité des eaux dans les régions karstiques et délimitation des zones de protection; méthodologie EPIK. Rapport intermédiaire, phase 3a 1994/1995, Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, pour l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, unveröffentlicht.

Ford, T.D. & Williams, P.W. 1989: Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman, London, Boston, Sydney, Wellington, 601 p.

Gilbrich, W.H. & Zaporozec, A. 1994: Introduction. In Vrba J. & Zaporozec A. (eds): Guidebook on mapping groundwater vulnerability, IAH, International contributions to hydrogeology 16: 1-2, Hannover.

Grasso, A.D. & Jeannin, P.-Y. 1994: Etude critique des méthodes d'analyse de la réponse globale des systèmes karstiques. Application au site de Bure (JU, Suisse). Bulletin d'Hydrogéologie N° 13, 87-113, Peter Lang, Berne.

Gretillat, P.-A. 1986: Etude pour l'établissement d'une décharge cantonale de classe 3 dans la région des Convers (NE). Mémoire de diplôme de 3ème cycle en hydrogéologie, Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 57 p., unveröffentlicht.

Jäckli AG & OEHE 1981: Hydrogéologie du Vallon de St-Imier, données pour la protection et la gestion de l'eau souterraine du canton de Berne. Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne (OEHE).

Jeannin, P.-Y. 1996: Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques. Thèse, Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel.

Jeannin, P.-Y. & Grasso, A.D. 1995: Recharge respective des volumes de roche peu perméable et des conduits karstiques, rôle de l'épikarst. Bulletin d'Hydrogéologie N° 14, 95-111, Peter Lang, Berne.

Jeannin, P.-Y., Király, L. & Doerfliger, N. 1993: Développements possibles dans le domaine de la détermination des zones de protection, concept de vulnérabilité des aquifères karstiques. Rapport de la première phase du projet, Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, pour le Service hydrologique et géologique national, unveröffentlicht.

Kellerhals + Haefeli AG 1988: Schutzzonen für die Blatti-Quelle der WV Lenk. Bericht Nr. 1140 vom 18.2.1988, Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern, unveröffentlicht.

Klimchouk, A. 1995: Karst morphogenesis in the epikarstic zone. Cave and Karst science Vol. 21, N° 2, March 1995. Transactions of the British Cave Research Association, 45-50.

Mangin, A. 1975: Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de Doctorat d'Etat, Dijon, 124p. Ann. Speleo., 1974 19(3), 283-332; 29(4), 495-601; 30(1), 21-124.

Nabholz, W. & Häberli, W. 1972-1979: Berichte über hydrologische Messungen Rawil-Nordseite, unveröffentlicht.

Sautier, J.-L. 1984: Guide du Service Fédéral d'Améliorations foncières, 1984.

Schindler, B. 1988: Etude hydrogéologique de la zone S des captages sis à Cormoret et Villeret, 2ème partie. Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne (OEHE), unveröffentlicht.

Smart, P. & Friedrich, H. 1986: Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer. Mendip Hills, England, Proc. Conf. Env. Problems of karst terranes and their solutions, 1986, National Water Well Association, Dublin, Ohio, 59-87.

Tâche, E., Doerfliger, N. & Zwahlen, F. 1996: Vulnérabilité des eaux dans les régions karstiques et délimitation des zones de protection. Méthodologie EPIK. Rapport de la phase 3b 1995/1996, Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, pour l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, unveröffentlicht.

Wildberger, A. 1981: Zur Hydrogeologie des Karstes im Rawil-Gebiet. Beitr. Geol. Schweiz - Hydrol. 27 (gekürzte Version der Dissertationsschrift 1979, Universität Bern).

- 1984: Karst du Rawyl (Hautes-Alpes calcaires helvétiques, Suisse occidentale); matières dissoutes et en suspension emportées par les sources. Karstologia N° 4, 29-34.

Williams, P.W. 1983: The role of subcutaneous zone in karst hydrology. J. Hydrol. 61, 45-67.

Zaporozec, A. 1985: Groundwater pollution potential of Barron County, Wisconsin. Wis. Geological and Natural History Survey, Madison, WI.

Gesetzliche Grundlagen:

Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (GSchG, SR 814.20) vom 24. Januar 1991.

Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201) vom 28. Oktober 1998.