

Ergebnisse österreichischer Aktivitäten im Internationalen Hydrologischen Programm (IHP) 1981–1990			Redaktion: Walter Kollmann & Albert Daurer		
	Arch. f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A.	ISSN 0253-097X ISBN 3-912-300312-84-2	Band 14	S. 119–131	Wien, Februar 1993

Karstwasserreserven der Villacher Alpe (Kärnten)

Von GERHARD PROBST & HANS ZOJER*)

Mit 7 Abbildungen und 3 Tabellen

*Österreich
Kärnten
Villacher Alpe
Karst
Grundwasser
Umweltisotope
Hydrologie
Hydrochemie*

*Österreichische Karte 1 : 50.000
Blätter 200, 201*

Inhalt

Zusammenfassung	119
Abstract	119
1. Geologische Grundlagen	120
2. Hydrogeologische Untersuchungen	120
3. Hydrologische Verhältnisse	120
3.1. Verteilung des Niederschlages im Untersuchungsgebiet	120
3.2. Abflußverhältnisse	120
4. Hydrochemische Untersuchungen	121
5. Unterirdische Entwässerungsdynamik	124
5.1. Abflußseparation bei der Thomas- und Unionquelle	124
5.2. Berechnungen zu Speicherkapazität der Thomas- und Unionquelle	126
6. Untersuchungen mit Hilfe der Umweltisotope	126
6.1. Tritiumuntersuchungen	127
6.2. Sauerstoff-18-Messungen	128
7. Durchführung eines Markierungsversuches	129
8. Grundwasserverhältnisse im Raum Warmbad Villach	131
Literatur	131

Zusammenfassung

Das Institut für Geothermie und Hydrogeologie (Joanneum Research, Graz) wurde im Rahmen der Bund-Bundesländer-Kooperation vom Geocenter – Rohstoffforschung Kärnten mit der Durchführung der hydrogeologischen Untersuchungen im Rahmen des Projektes „Karstwasserreserven der Villacher Alpe, Teil I – III-KA-24b“ betraut. Nachfolgend wird eine Übersicht über die Ergebnisse der dreijährigen Untersuchungsdauer geboten.

Karstwater Resources of the “Villacher Alpe“ (Carinthia)

Abstract

Within the scope of the “Bund-Bundesländer-Kooperation“ (Federal Cooperation) the Institute of Geothermy and Hydrogeology (Joanneum Research, Graz) has been entrusted with the realization of hydrological investigations within the project “Karstwater Resources of the Villacher Alpe“. A summary of results obtained from the three-year research has been carried out.

*) Anschrift des Verfassers: GERHARD PROBST, Univ.-Prof. Dr. HANS ZOJER, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Joanneum Research, Elisabethstraße 16/II, A-8010 Graz.

1. Geologische Grundlagen

Die Villacher Alpe bildet das östlichste Glied des Drauzuges. Dieser lagert transgressiv dem Gailtalkristallin auf. Zusammen bilden sie den südlichsten Teil des Oberostalpins. Seine Begrenzung im S stellt die E-W-verlaufende Periadriatische Naht dar. Diese tektonische Linie sowie die Drau-Möll-Linie und der Bleiberger Bruch im N der Villacher Alpe sind für die isolierte Stellung des Bergstockes verantwortlich. Im Schnittpunkt der tektonischen Linien kam es zum Einbruch des Villacher Beckens. Damit im Zusammenhang steht die Abtrepfung der Villacher Alpe in mehreren Staffeln gegen E.

Die Basis der Villacher Alpe bilden das Gailtalkristallin und das Karbon von Nötsch, welche in variszischer Zeit eine gemeinsame Tektonik erfahren haben. Darüber lagern transgressiv und mit einer deutlichen Winkeldiskordanz die Permoskyth-Sandsteine. Mit dieser Formation setzt eine kontinuierliche Sedimentationsfolge bis zum Hauptdolomit im Nor ein. Werfener Schichten sind an der Westseite des Dobratsch durchgehend aufgeschlossen und können an seiner Südseite bis nördlich Oberschütt verfolgt werden. Zweifelsohne ist ihr Gipsgehalt beträchtlich, da die am Südfuß der Villacher Alpe auftretenden Quellen einen z.T. beträchtlichen SO_4^{2-} -Gehalt aufweisen.

Der Alpine Muschelkalk ist am Dobratsch durch das häufige Auftreten von gipsführenden Tonschiefern, wechsellagernd mit Dolomiten, die in den hangenden Partien allein gesteinsbildend sind, gekennzeichnet. Diese anisotischen Kalke fallen generell mittelsteil gegen S ein.

Wettersteinkalke und Dolomite aus dem Ladin bauen den größten Teil der Villacher Alpe auf. Den liegenden Anteil der Wettersteinformation bilden die Wettersteindolomite. Diese weißgrauen, milchigen, massigen bis cm-gebankten und tektonisch stark zerlegten Dolomite stehen nur an der Nordseite der Villacher Alpe an. Die Grenze der Wettersteindolomite zu den lagunären Wettersteinkalken ist fließend und lateral auch verzahnt. Im Karn wechseln Carditaschiefer und Karbonate. Der ins Nor gestellte gut geschichtete hellgraue Hauptdolomit zeigt zum Teil schichtparallele, mittel- bis dunkelgraue, cm- bis m-mächtige Bänder und Fläsern. Das Vorkommen beschränkt sich auf den Nordostteil des Bearbeitungsgebietes.

Quartäre Sedimente sind im gesamten E und NE der Villacher Alpe sowie am Pungart und auf der Kaserin anzutreffen. Es handelt sich dabei einerseits um Moränen, andererseits um fluviatile Grob- und Feinklastika des Periglazials. Die durch den Eisrückzug hervorgerufene Instabilität der Bergflanken bewirkte zahlreiche Bergzerreibungen und damit örtlich die Entstehung subrezenter Bergsturzmassen.

2. Hydrogeologische Untersuchungen

Eine hydrogeologische Detailkartierung umfaßte die Aufnahme von Quellen an der Dobratsch-Nordseite von Bleiberg/Kreuth im W bis einschließlich der Ostabtrepfung des Dobratsch gegen Villach hin. Die an der Südseite austretenden Quellen waren aus früheren Untersuchungen bereits bekannt. Neben der Messung der gängigen Feldparameter wurde eine chemische und isopenhydrologische Übersichtsbeprobung an 41 ausgewählten Quellen durchgeführt, deren Interpretation bereits erste Rückschlüsse auf mögliche Einzugsgebiete von Quellen und Hinweise auf ihre unterirdische Speicherung erlaubte.

Aufgrund der Lage der Großquellen ist der Hauptteil der unterirdischen Entwässerung des Karststockes nach E gerichtet. Eine dominierende Stellung nehmen die Austritte der Thomas- und Unionquelle im E der Villacher Alpe ein. Sie versorgen einen Großteil der Bevölkerung mit Trinkwasser. Der sogenannten Nötschbachquelle, einem weiteren bedeutenden Wasseraustritt im Bleiberger Tal, wird aufgrund der niedrigen elektrolytischen Leitfähigkeit und der kalten Wassertemperatur ein geringes Speichervermögen und ein hochgelegenes Einzugsgebiet zugesprochen. Andere Quellen weisen entsprechend ihrer Durchströmung verschiedener lithologischer Einheiten differenzierte Eigenschaften auf.

Untersuchungen im Raum Warmbad Villach brachten die Darstellung der geologischen Verhältnisse dieses Raumes, weiters wurden die vorhandenen geophysikalischen Gutachten (F. WEBER, H. JANSCHKE) über dieses Gebiet aufgearbeitet. Anhand der bisher vorliegenden Untersuchungen wurde auf die Mechanik der Quellaustritte im Warmbader Bezirk eingegangen, die sowohl warme als auch kalte Quellaustritte betrifft. Untersuchungen der chemischen Beschaffenheit der Thermalwässer und Untersuchungen mit Hilfe der Umweltisotope runden das Bild ab. Die Ergebnisse zeigen, daß dem Thermalwasser eine ältere Komponente beigemischt ist, wobei die Mischung des kalten und warmen Wassers in großer Tiefe vor sich geht. Die Thermalwässer zeigen grundsätzlich keine gravierenden Unterschiede in ihrem chemischen Habitus. Sie sind von einem Calcium-(Magnesium)-Hydrogencarbonat-Typ. Desgleichen wurde auf die Grundwasserverhältnisse im Warmbader Raum eingegangen, wobei ein Grundwasserhochstand einem Grundwassertiefstand gegenübergestellt wurde. Dabei ergaben sich deutliche Abweichungen in der Fließrichtung des Grundwassers.

3. Hydrologische Verhältnisse

3.1. Verteilung des Niederschlages im Untersuchungsgebiet

Für die Berechnung der räumlichen Niederschlagsverteilung im Bereich der Villacher Alpe stand eine 50-jährige Reihe von mehreren Stationen zur Verfügung. Die Berechnungen ergaben einen mittleren Gebietsniederschlag von 1360 mm für den gesamten Gebirgsstock. Die durchschnittliche Verdunstung beträgt nach TURC unter Zugrundelegung einer mittleren Temperatur von $6,1^\circ\text{C}$ etwa 422 mm/J.

3.2. Abflußverhältnisse

Durch die Errichtung von vier automatischen Pegelstationen (Maibachl, Warmbach, Kaltbach und Fellach) wurden Kenntnisse über die oberirdische Abflußdynamik des Thermalwassers und des Kaltwassers gewonnen.

Für das Maibachl wurde eine Schlüsselkurve erstellt (Tab. 1), die zeigt, daß die episodischen Schüttungsmengen mehr als 200 l/s erreichen können. Die Abflußspitze erscheint im Gegensatz zu jener bei typischen Karstquellen sehr flach und sogar gekappt.

Der Detailverlauf der Abflußganglinie gibt erste Hinweise auf den Charakter der Entwässerung durch das Maibachl. Wie bereits hinlänglich bekannt, springt das Gerinne an, wenn heftige Regenfälle oder die Schneeschmelze einen hydrostatischen Druck auf das im Bergleib gespeicherte Thermalwasser ausüben. Unmittelbar nach dem Überlaufen steigt der Abfluß rasch an, nach Erreichen

Tabelle 1.
W-Q-Tabelle Maibachl (Schlüsselkurve in l/s).

cm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10										12
20	15	20	25	30	35	40	47	54	61	68
30	75	85	95	105	115	125	138	151	164	177
40	190									

eines Maximums fällt sodann die Abflußganglinie nur langsam bis zum Trockenfallen wieder ab. Wenn im Zuge des langsamen Schüttungsrückganges ein neuer Schub für die Karstwasserneubildung eintritt – wie Anfang April 1987 – steigt die Schüttung nur mehr langsam an, der Abfall ist ebenso zögernd wie vorher.

Der Warmbach stellt den Gesamtabfluß der Thermalquellen von Warmbad Villach und – wenn aktiv – des Maibachls dar. Während der Untersuchungsperiode wurde eine Abflußmenge von 50 l/s nicht unterschritten.

Die bisherigen Untersuchungen beim Pegel Kaltbach ergaben eine große Schwankungsbreite des Abflusses, der zwischen 15 und 350 l/s liegt. Im Vergleich dazu variierte der Abfluß der Studenza (Ursprung des Kaltbaches) nach Remy'schen Messungen 1970 zwischen 0 und 800 l/s. Dies deutet sowohl auf laminare Bachzutritte im weiteren Bereich der Römerquelle als auch auf die Alimentation durch einen Porengrundwasserkörper hin, der sich zwischen der Napoleonwiese und der Graschelitzen bis in das Gailtal erstreckt.

Die Fellach entwässert den nordöstlichen Abschnitt der Villacher Alpe in der weiteren Umgebung von Heiligengeist. Die Abflußschwankungen lagen zwischen 50 und 600 l/s, wobei die hohen Werte vornehmlich auf den hier beachtlichen Oberflächenabfluß zurückzuführen sind.

4. Hydrochemische Untersuchungen

Nach Abschluß der hydrogeologischen Kartierung, die die Messung der gängigen Feldparameter sowie eine Probennahme zur Feststellung der Ionenbilanz beinhaltete, wurde an 16 ausgewählten Quellen und an einer Bohrung eine Langzeituntersuchung im Monatsrhythmus durchgeführt, um Rückschlüsse auf mögliche Einzugsgebiete und die Speicherfähigkeit im Untergrund zu erhalten. Auswahlkriterien waren in erster Linie die Größe des Dargebotes, die Nutzung zur Trinkwasserversorgung und nicht zuletzt die Entwässerung aus verschiedenen hydrogeologischen Einheiten. In weiterer Folge sollten diese Ergebnisse auch der Planung eines großen Markierungsversuches dienen.

Nachstehende Quellen wurden für die Beobachtung während der Versuchsdauer ausgewählt:

- V 2 Leininger Quelle
- V 8 Torquelle
- V 14 Lerchbachquelle
- V 34 Nötschbachquelle
- V 65 Schachenquelle
- V 112 Unionquelle
- V 113 Thomasquelle
- V 131 Rössmannquelle
- V 134 Quelle Mölttschach
- ROQ Römerquelle
- STH Studenzahöhle
- HBQ Hallenbadquelle

- FBQ Freibadquelle
- NQ Neue Quelle
- ZBQ Zillerbadquelle
- TQ Tschamerquelle
- TBO Tiefbohrung 1/81

Von den aus der Dauerbeobachtung gewonnenen Daten wurden vorerst die Gesamtmineralisation, das Ca/Mg-Verhältnis, dessen Jahresschwankung und Auffälligkeiten anderer physikalisch-chemischer Parameter (z.B. Temperatur, Schüttung, Jahresgang von Calcium und Magnesium, Nitrat, Sulfat) für eine Interpretation herangezogen.

Eine erste Übersicht erlaubt die Betrachtung der Gesamtmineralisation, die sich in den Werten der elektrolytischen Leitfähigkeit widerspiegelt. Es lassen sich Gruppen erkennen, die entsprechend ihren Einzugsgebieten und den dort auftretenden lithologischen Gegebenheiten eine Zuordnung der Quellen erlauben. Die Menge der gelösten Stoffe kann unter Umständen innerhalb gleicher geologischer Einheiten Hinweise auf die Speicherung des Wassers im Untergrund geben.

Die Quelle Mölttschach weist die höchste Gesamtmineralisierung (im Mittel 15,5 mval/l) der untersuchten Quellen auf, die teils auf das Durchströmen der eiszeitlichen Ablagerungen im Einzugsgebiet der Quelle und teils auch auf anthropogene Verschmutzungen zurückzuführen ist.

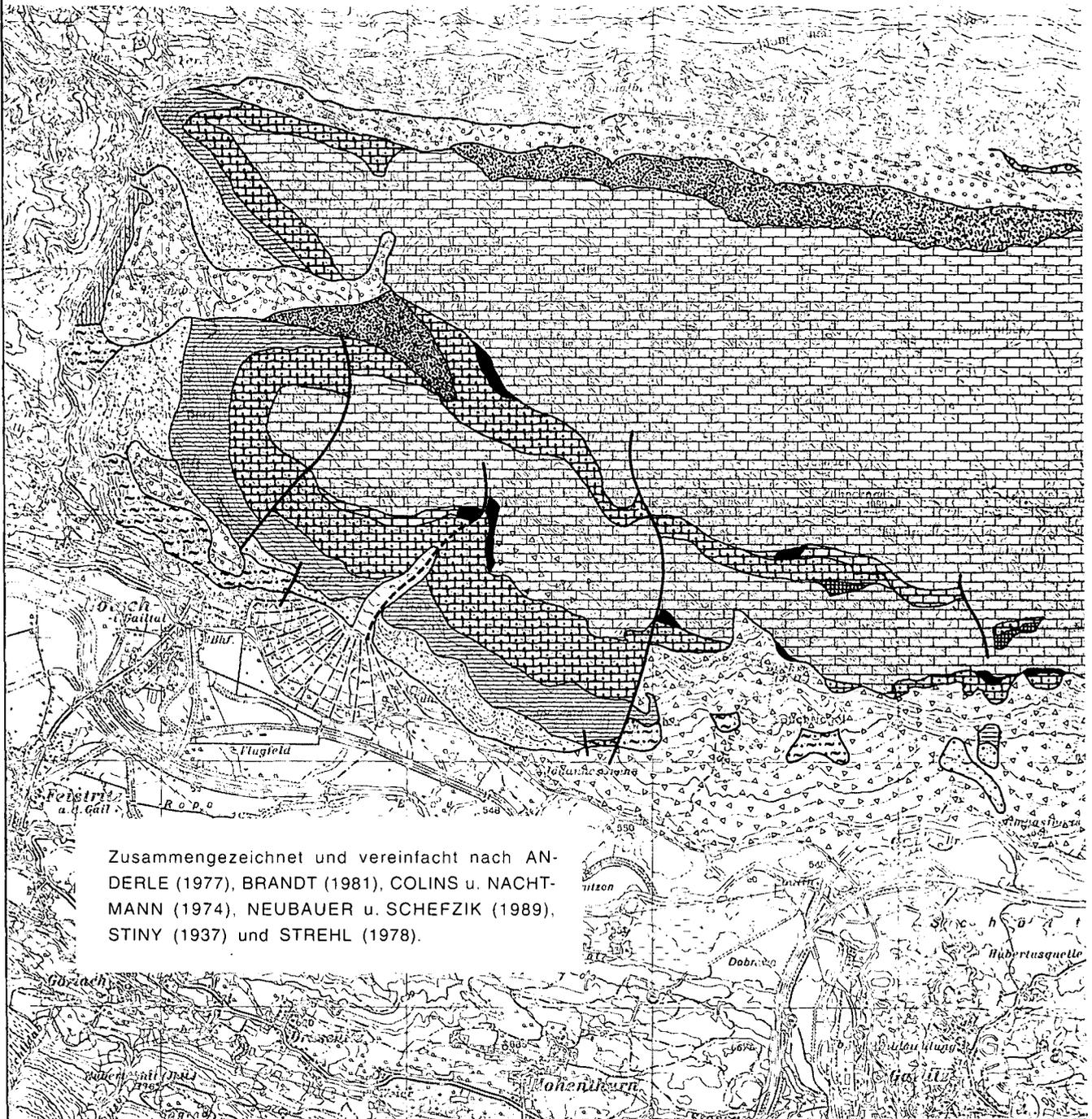
Eine Gruppe mit einer Gesamtmineralisation zwischen 7,63 und 9,50 mval/l umfaßt die Quellen V 8, V 65, V 131 und V 14. In ihrem Einzugsgebiet überwiegen dolomitische Gesteine, die üblicherweise weniger zur Verkarstung neigen und daher das Wasser besser zu speichern vermögen. Der Leiningerquelle ist aufgrund ihrer Lage ein orographisches Einzugsgebiet in den Wettersteinkalken und -dolomiten zuzuweisen.

Obwohl die beiden großen Quellen im E des Untersuchungsgebietes mit den größten Schüttungen ins Auge stechen, die auch ein entsprechendes Einzugsgebiet und eine gewisse Speicherung im Untergrund erfordern, zeigen sie doch eine verhältnismäßig geringe Gesamtmineralisation (im Mittel 6,60 bzw. 6,46 mval/l). Diese Tatsache erweist sich als typisch für Karstquellen, deren Abflußdynamik durch schnelle Reaktionen auf starke Niederschlagsereignisse oder auf Schneeschmelzperioden gekennzeichnet ist. Die Römerquelle und die Studenzahöhle zeigen in dieser Hinsicht ein noch extremeres Verhalten, wobei die höher gelegene Studenzahöhle als Karstüberlauf fungiert.

Die niedrigste Gesamtmineralisierung aller Quellen (im Mittel 4,36 mval/l) hat die Nötschbachquelle, die am Nordabfall des Dobratsch oberhalb von Bad Bleiberg austritt. Die kurze Verweilzeit im Untergrund äußert sich nicht nur in einem geringen Gehalt an gelösten Stoffen, sondern auch in starken Schüttungsschwankungen nach Niederschlagsereignissen und Schneeschmelzen und zeugt von einer intensiven Verkarstung im Einzugsgebiet.

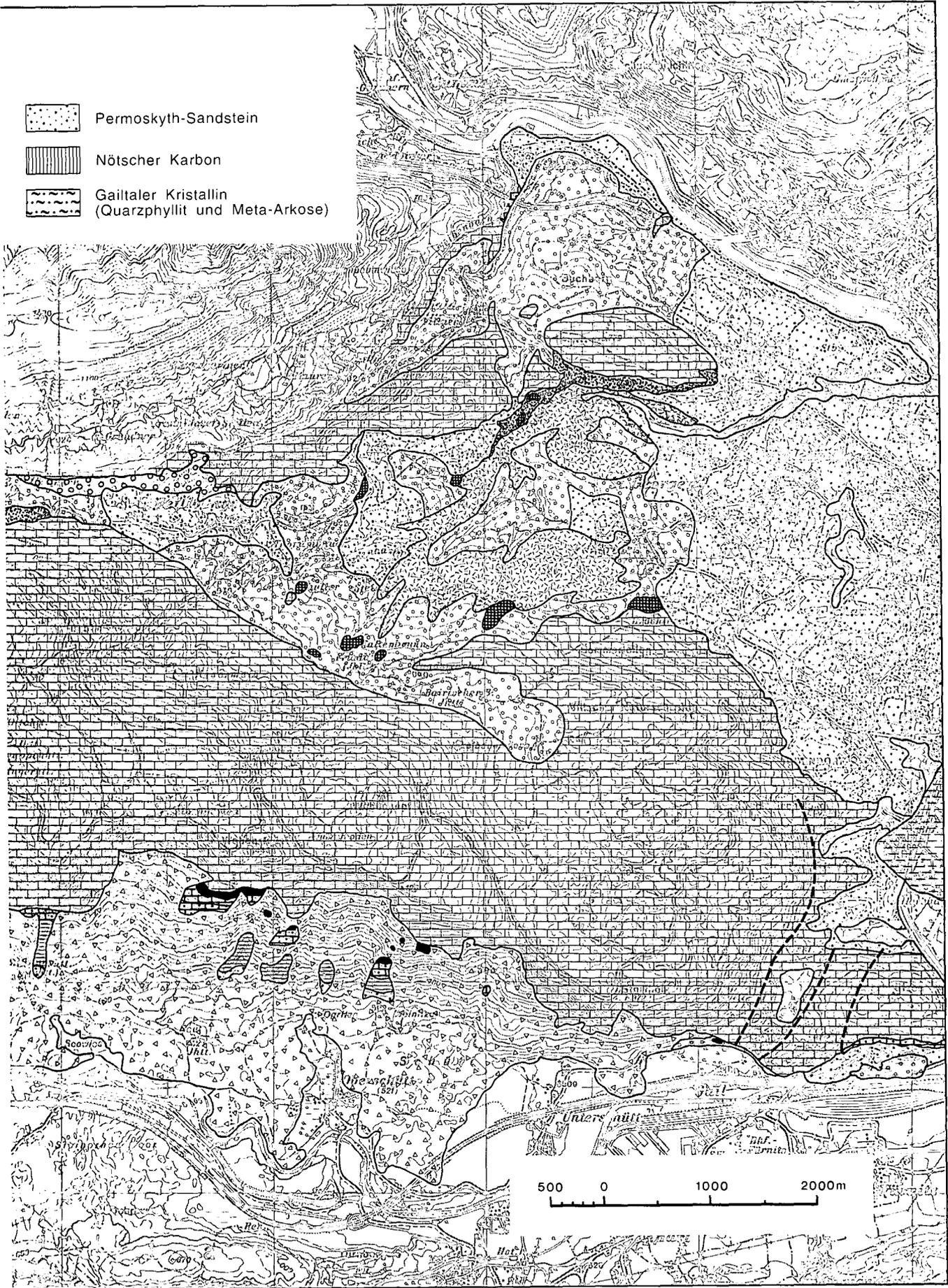
Das Ca/Mg-Verhältnis gibt Auskunft über Kalk- oder Dolomitdominanz im Einzugsgebiet einer Quelle und spie-

- | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|  | Alluvionen |  | Bänderton |  | Wettersteinkalk und -dolomit (Ladin) |
|  | Schwemmkegel |  | Moränen |  | Vulkanit (Anis / Ladin) |
|  | Hangschutt |  | Bleiberger Konglomerat |  | Mitteltriadische Buntkalke (Anis) |
|  | Bergsturz |  | Hauptdolomit (Nor) |  | Alpiner Muschelkalk (Unter-Anis) |
|  | Terrassen |  | Raibler Schichten (Karn) |  | Werfener Schichten (Skyth) |



Zusammengezeichnet und vereinfacht nach ANDERLE (1977), BRANDT (1981), COLINS u. NACHTMANN (1974), NEUBAUER u. SCHEFZIK (1989), STINY (1937) und STREHL (1978).

Abb. 1. Geologische Übersichtskarte der Villacher Alpen.



gelt so geologische Verhältnisse wider. Die im Untergrund fließenden Wässer erreichen unter Lösung von Calcium- und Magnesiumcarbonat zuerst die Calcitsättigung und steuern je nach ihrer Umgebung und Speicherung der Dolomitsättigung zu. Daraus kann unter Berücksichtigung der geologischen Gegebenheiten, ein Bezug zu guter oder weniger guter Speicherfähigkeit einer Quelle hergestellt werden (Abb. 2).

Die niedrigsten Werte zeigen jene Quellen, deren Einzugsgebiet im Wettersteindolomit bzw. Hauptdolomit liegt. Quellen mit einem Ca/Mg-Verhältnis zwischen 2 und 3 lassen bereits auf ein Überwiegen von kalkigen Karbonatgesteinen in ihren Einzugsgebieten schließen. Eine eindeutige Dominanz von kalkigen Karbonatgesteinen in ihrem Einzugsgebiet bezeugen Quellen, deren Ca/Mg-Verhältnis über 3 liegt. Dazu zählen die beiden großen Quellen im E, die Union- und Thomasquelle.

Der Jahresgang der Sulfatkonzentration ist bei den meisten Quellen im Untersuchungsraum von konstantem Verlauf, mit Ausnahme der Quellgruppe Lerchbach, wo aufgrund der höheren Konzentrationen auch größere Schwankungen auftreten können. Während es zur Zeit der Schneeschmelzperiode durch den vermehrten Abfluß zu einem Verdünnungseffekt kommt, der bei den meisten Ionen zu einer Konzentrationsabnahme führt, tritt beim Sulfat ein gegenteiliger Effekt auf, der sich in einer Konzentrationszunahme äußert. Da Gips relativ leicht löslich ist, kommt es durch die vermehrte Wassermenge zu einem Prozeß der „Auswaschung“, so daß der SO_4^{2-} -Gehalt zunimmt. Dies trifft mit Ausnahme der Quellen V14 und V65 für alle anderen Wasserspenden zu.

Die Warmbader Quellen müssen aufgrund ihrer Genese einer gesonderten Betrachtungsweise unterzogen werden. Sie sind durchwegs von einem Calcium-(Magnesium)-Hydrogencarbonat-Typ und weisen im allgemeinen keine gravierenden Unterschiede in ihrem Chemismus auf. Die mittlere Ca/Mg-Relation zwischen 3,69 und 3,84 mval/l läßt ein Einzugsgebiet in kalkhaltigen Gesteinen vermuten, wobei in einer Zeit geringen Bergwassernachschubes von der Oberfläche her (Winter) durchaus die Calcit- und Dolomitsättigung durch den längeren Konakt des Wassers mit dem Gestein erreicht werden kann. Generell reagieren alle Thermalaustritte, am wenigsten noch die Hallenbadquelle, auf Einflüsse durch rezente kalte Wässer, die nach längeren heftigen Niederschlagsereignissen dem aus der Tiefe kommenden warmen Wasser beige-mischt werden. Die Schneeschmelze zeigt unterschiedliche Auswirkungen in zeitlicher Hinsicht, sie wird unter anderem durch ein Fallen der Wassertemperatur, besonders bei den Quellen mit geringer Schüttung, dokumentiert.

5. Unterirdische Entwässerungsdynamik

5.1. Abflußseparation bei der Thomas- und Unionquelle

Untersuchungen der Auswirkungen der Schneeschmelze mit Hilfe einiger chemischer Parameter bei der Thomas-

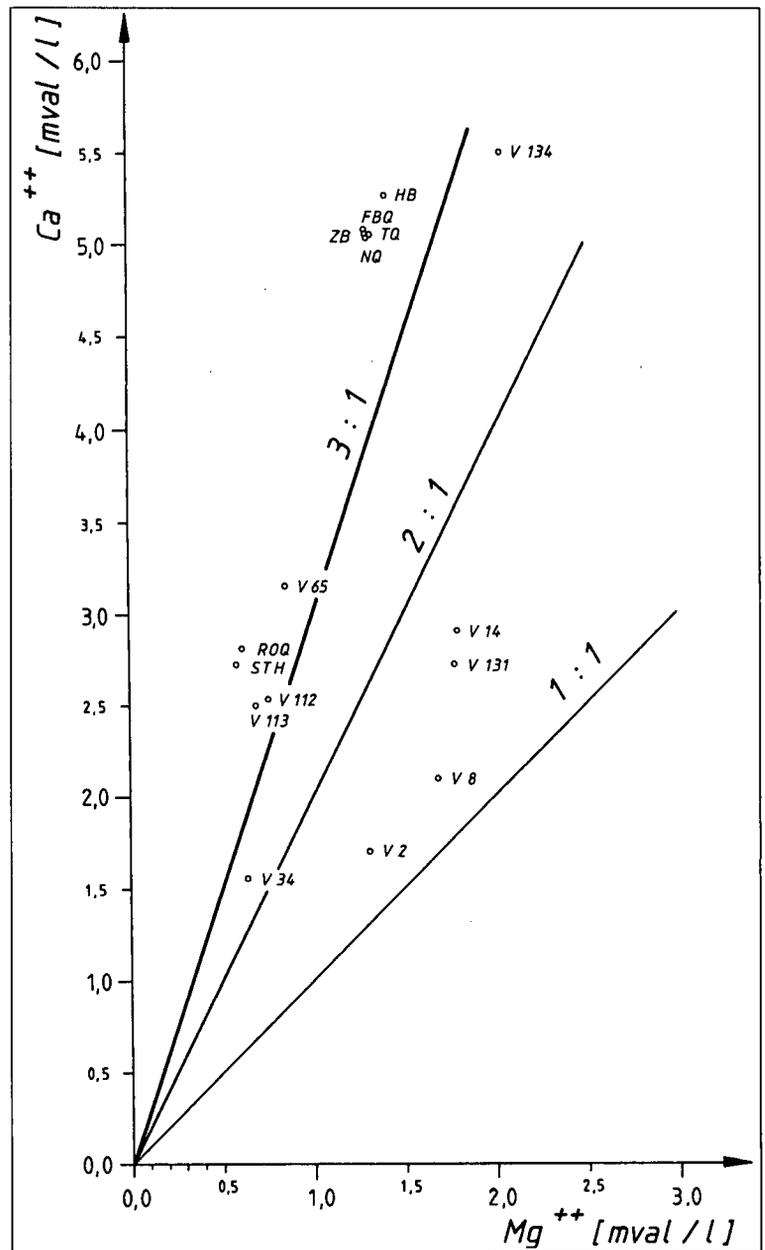


Abb. 2. Ca/Mg-Verhältnisse (Mittelwerte) der erfaßten Quellen.

und Unionquelle betrafen die Abflußdynamik dieser Karstquellen.

Jedes Karstsystem ist durch eine ausgeprägte Heterogenität der Durchlässigkeit charakterisiert und ist als ein System von Blöcken und Kanälen zu verstehen. Ebenso verschieden sind die Inputbedingungen, wobei ein Teil des Niederschlages die großlumigen Öffnungen des Karstkörpers schnell erreicht, während ein anderer Teil länger im feinen Kluftnetz verbleibt.

Die diesem Modell entsprechenden schnell und langsam fließenden Komponenten widerspiegeln sich in den physikalisch-chemischen Parametern am Quellaustritt.

Zur Zeit der Schneeschmelze oder durch länger andauernde Niederschlagsereignisse kommt es im allgemeinen zu einer Verminderung der Ionenkonzentrationen durch die rasch fließenden Komponenten, während in Trockenperioden höher mineralisiertes Wasser aus den Blöcken angeliefert wird. Mit Beginn der Schneeschmelze tritt ein

„Piston-Effekt“ auf, der sich in einer Zunahme der Ionenkonzentration äußert. Eine mögliche Erklärung dieses „Piston-Effektes“ ist das Ausfließen eines höher mineralisierten, älteren Wassers infolge des starken Anstieges des hydraulischen Druckes. Der Verlauf der Ganglinien des Calciums und des Magnesiums dokumentiert einen deutlichen Verdünnungseffekt des Quellwassers durch frisches Infiltrat, allerdings tritt diese Verdünnung mit einer Verzögerung gegenüber der Schüttungszunahme auf.

Eine vom direkt zu beobachtenden Abflußgeschehen unabhängige begründbare Abtrennung des Basisabflusses vom Direktabfluß ist bei kombinierter Beobachtung des Abflußvorganges am Quellaustritt und geochemischen Analysen des Niederschlagswassers und des am Quellaustritt ausfließenden Wassers möglich. Voraussetzung dafür sind „Markierungsstoffe“, die nicht oder nur unwesentlich durch chemische Prozesse im Untergrund beeinflusst werden.

Neben den stabilen Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotopen kann auch das relativ stabile Kation Natrium für solche Berechnungen herangezogen werden. Aufgrund der schnellen Reaktion der Unionquelle auf die Schneeschmelze oder auf entsprechende Niederschlagsereignisse kann auch die Magnesiumaktivität für solche Berechnungen dienen, da durch den raschen Durchfluß wenig Zeit für Lösungsvorgänge bleibt und daher der Verdünnungseffekt ausgenutzt werden kann.

Für die Ganglinie des Abflußereignisses an der Unionquelle können daraus zwei Massenbilanzgleichungen für den Abfluß und für die Konzentration der chemischen Parameter am Quellaustritt zur Zeit t formuliert werden:

$$Q_G = Q_1 + Q_2$$

und

$$Q_G \cdot C_G = Q_1 \cdot C_1 + Q_2 \cdot C_2$$

mit

- Q_G ... Gesamtabfluß am Quellaustritt (l/s),
- C_G ... Gesamtkonzentration am Quellaustritt (mg/l),
- Q_1 ... Basisabfluß (l/s),
- C_1 ... Konzentration des Basisabflusses (mg/l),
- Q_2 ... Direktabfluß (l/s),
- C_2 ... Konzentration des Niederschlagswassers (mg/l).

Durch die Kombination beider Gleichungen ergibt sich

$$Q_2 = Q_G (C_G - C_1) / (C_2 - C_1)$$

Damit ist es möglich, durch Messung des Abflusses und der Konzentration des Niederschlages und des Abflusses am Quellaustritt, den Beitrag des Niederschlagswassers bzw. des Schneeschmelzwassers von den anderen Abflußkomponenten in der Abflußganglinie zu unterscheiden. Die Berechnungen wurden mit der Aktivität der beiden Kationen Natrium und Magnesium durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Natriumaktivität (Abb. 3) zeigen am Beginn des Hydrogrammes einen Frischwasseranteil von rund 20 %, während das Schüttungsminimum nur mehr aus dem Basisabfluß bestritten wird. Dieselbe Auswertung mit der Magnesiumaktivität ergibt wesentlich geringere Frischwasseranteile, die bis zum Schüttungsminimum hin immer mehr abnehmen (Abb. 4). Eindeutig ist jedoch bei beiden Beispielen ein Anstieg des Basisabflusses gleichzeitig mit der Zunahme des Direktabflusses am Beginn der Schneeschmelze zu beobachten – ein Hinweis, daß mit steigender Schüttung zuerst ein älteres, hochmineralisiertes Wasser herausgedrückt wird. Danach nimmt der Anteil am Direktabfluß rasch zu und erreicht bei der Berechnung mit Hilfe der Magnesiumaktivität knapp 50 %

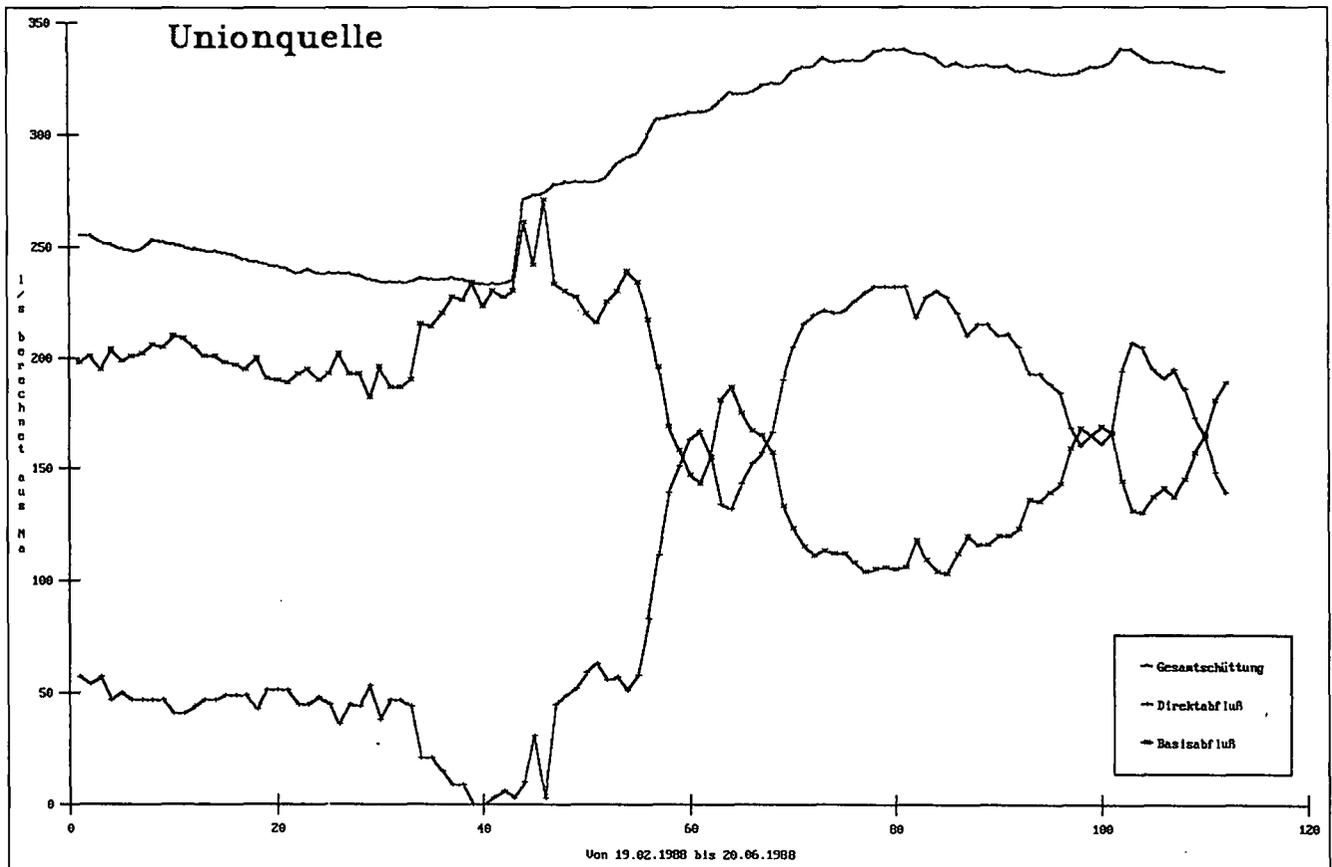


Abb. 3. Auftrennung des Direkt- und Basisabflusses vom Gesamtabfluß an der Unionquelle mit Hilfe der Natriumaktivität während einer Schneeschmelzperiode.

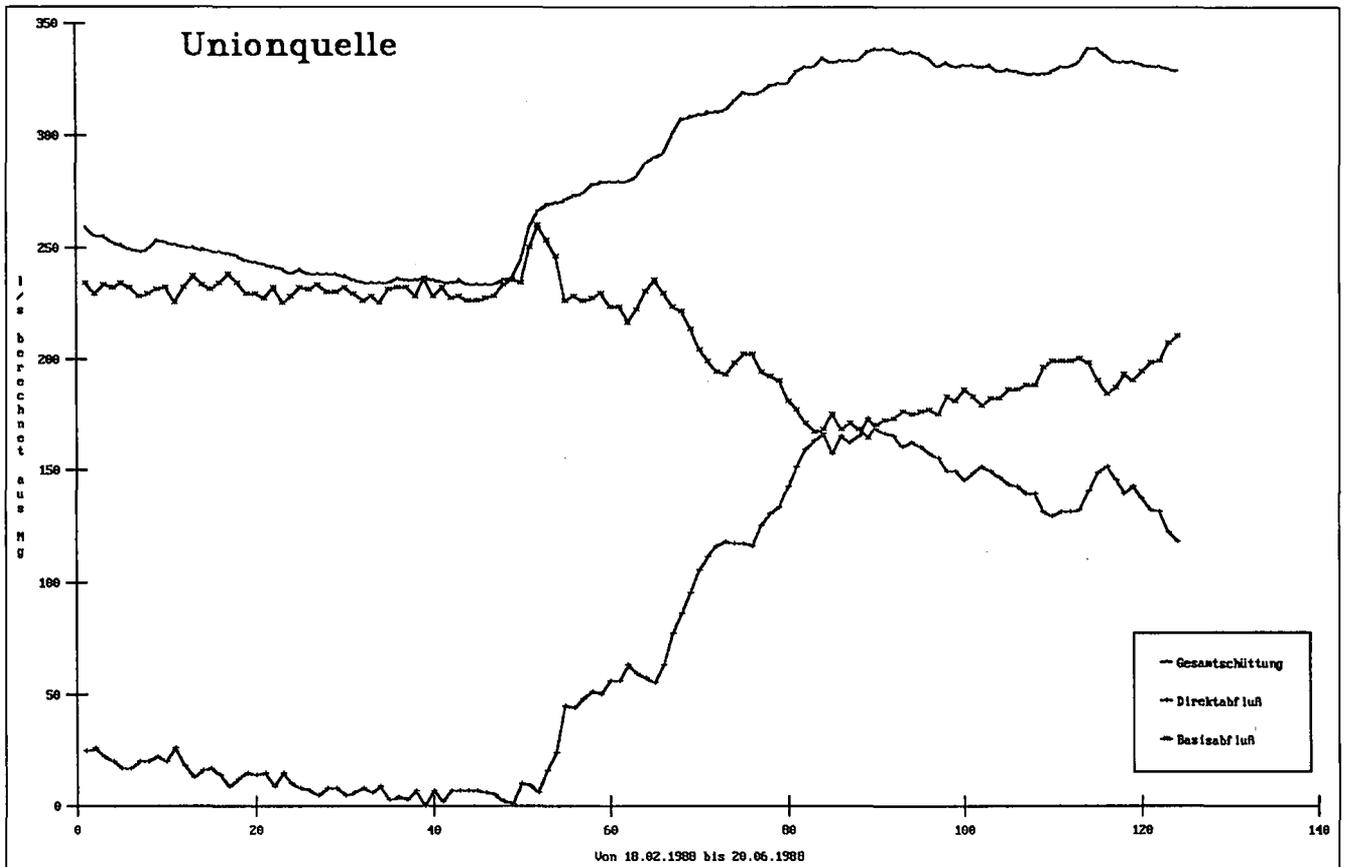


Abb. 4. Auftrennung des Direkt- und Basisabflusses vom Gesamtabfluß an der Unionquelle mit Hilfe der Magnesiumaktivität während einer Schneeschmelzperiode.

samtabflusses, während sich mittels Natriumaktivität nahezu 70 % im Schüttungsmaximum ergeben. Der Anteil des Basisabflusses zu dieser Zeit (etwa 30 %) ist immer noch relativ hoch – ein weiterer Hinweis auf eine entsprechende Speicherkapazität der Quelle.

5.2. Berechnungen zur Speicherkapazität der Thomas- und Unionquelle

Die Union- und Thomasquelle wurden in Hinsicht auf eine Abflußbilanz und auf ihr Speichervermögen untersucht. Die Berechnungen erfolgten über die MAILLET-Funktion. Ausgehend von der Trockenwetterlinie kann das Auslaufverhalten eines Speichers durch seinen Koeffizienten charakterisiert werden. Das noch abflußfähige Speichervolumen zu einem bestimmten Zeitpunkt wird mit Hilfe des Auslaufkoeffizienten ermittelt. Die Berechnungen erfolgten mit der Formel

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{t \times \log e}$$

Bei seiner Kenntnis ist die zu einem bestimmten Zeitpunkt im Quelleinzugsgebiet noch abflußfähige Grundwassermenge annähernd nach folgender Beziehung zu errechnen:

$$M_1 = Q_t / \alpha \text{ [m}^3\text{]}$$

$$M_2 = Q_0 / \alpha \text{ [m}^3\text{]}$$

- Q_t ... Schüttung nach t (Tagen), die seit der Messung von Q_0 ... maximaler Schüttung zur Zeit (t_0) verstrichen ist,
 e ... Basis des Lg. naturalis (2,718),
 α ... Auslaufkoeffizient,
 M_1 ... Speichervolumen zur Zeit t_0 ,
 M_2 ... Speichervolumen zur Zeit t .

Daraus ergibt sich für die Unionquelle ein α -Wert von $0,7 \times 10^{-3}$ und einer maximalen Speichermenge von ca. 50 Mio. m^3 Wasser. Da für die Thomasquelle annähernd 60 % der Schüttung der Unionquelle angenommen werden kann, ergibt sich eine gesamte Speichermenge von ca. 80 Mio. m^3 Wasser für diese beiden Quellen. Aufgrund der geologischen Kartierung konnte eine Abgrenzung zweier möglicher Speicherräume getroffen werden. Daraus läßt sich ein Speichervolumen von 2,81 km^3 und ein Speichervolumen von 3,55 km^3 errechnen. Für diese beiden Speichergößen ergeben sich bei der Annahme, daß die Wassermenge des Reservoirs für die Wasserversorgung Villach 80 Mio. m^3 umfaßt, folgende Kluftanteile (K):

$$K1 = 100 / 2,81 \times 0,08 = 2,85 \%$$

$$K2 = 100 / 3,55 \times 0,08 = 2,26 \%$$

Dieser Kluftanteil erscheint realistisch, stellt aber nur den wasserdurchflossenen Teil dar. Es ist anzunehmen, daß auch an Kleinklüfte gebundenes Wasser vorhanden ist, welches langsamer von der Infiltrationsstelle in den Karstwasserkörper übergeht.

6. Untersuchungen mit Hilfe der Umweltisotope

Die Bestimmung der Umweltisotope des Wassermoleküls ist eines der bedeutendsten Hilfsmittel in der Tracerhydrogeologie:

- Die Art und Dämpfung der jahreszeitlichen Schwankungen geben Auskunft über das Speicherverhalten im Aquifer.

– langzeitige Mittelwerte der stabilen Isotope führen zu einer höhenmäßigen Gliederung von Quelleinzugsgebieten.

Von Wässern der Villacher Alpe liegen Reihenuntersuchungen aus zwei Zeiträumen vor: Tritiummessungen von 1970–1976 und Sauerstoff-18-Messungen aus dem Zeitraum 1986/87.

6.1. Tritiumuntersuchungen

Die Interpretation der Meßwerte gibt Auskunft über das Speicherverhalten im Untergrund. Dabei muß man von den Inputverhältnissen ausgehen, dem Tritiumgehalt des Niederschlages. Tritium gelangt über den Austausch Stratosphäre/Atmosphäre in den Wasserkreislauf. Diese Konzentration im Niederschlag liegt generell unter 10 TU. Durch Nukleartests in der Atmosphäre wurde in hohem Maße Tritium frei und gelangte bis zu einem tausendfachen Betrag in den Wasserkreislauf. Nach dem Stopp der

Atomversuche kam es zur einer deutlichen Konzentrationsverminderung im Niederschlag. Dieser Verlauf der Tritiumkonzentrationen im Niederschlag ist in Abb. 5 durch mittlere Halbjahreswerte der Station Wien gekennzeichnet.

Zwischen 1965 und 1973 fiel der Tritiumgehalt von 900 auf etwa 100 TU. Dieser Abfall vollzog sich nicht streng kontinuierlich, sondern ist als langfristiger Trend zu verstehen. 1970/71 gelangte noch einmal Bombentritium durch Versuche der Chinesen in die Atmosphäre.

Im einzelnen treten auch jahreszeitliche Schwankungen auf, was in Abb. 5 klar zum Ausdruck kommt. Überdies war der Tritiumgehalt 1973/74 generell etwas höher als im Jahr vorher und in den Jahren nachher.

Im Gegensatz zu den stabilen Isotopen kann beim Tritium nicht nur die Dämpfung der jahreszeitlichen Schwankungen Auskunft über das Speicherverhalten geben, sondern auch der generelle Trend der fallenden Konzentration. Umgelegt auf die vorliegenden Daten 1971–1976 läßt sich

daraus folgender Schluß ziehen: je steiler der Konzentrationsabfall ist, desto höher ist das mittlere Wasseralter und desto besser ist das Speicherverhalten des Aquifers. Zieht man nur jene Quellen in Betracht, von denen Tritium-Langzeitreihen vorliegen, muß der Thomas- und Unionquelle das beste Speicherverhalten zugesprochen werden, dies auch gegenüber der Nötschbachquelle. Die Tschamer- und Hallenbadquelle liegen in ihrem Tritiumgehalt hingegen deutlich unter jenem des Niederschlages. Bei den Thermalwässern von Warmbad Villach muß man überhaupt von einer Mischung aus unterschiedlicher Herkunft ausgehen: ein altes, wahrscheinlich tritiumfreies Wasser Heißwasserkomponente) und ein kurzfristig gespeichertes Wasser mit Tritiumkonzentrationen möglicherweise ähnlich den anderen Karstwässern (Kaltwasserkomponente). Die besten Speichereigenschaften sind der Lerchbachquelle (V 14) und den Quellen im S (bei Förk und am Rande der Schütt) eigen (Abb. 5, Gruppe A). Es fällt dabei auf, daß es sich

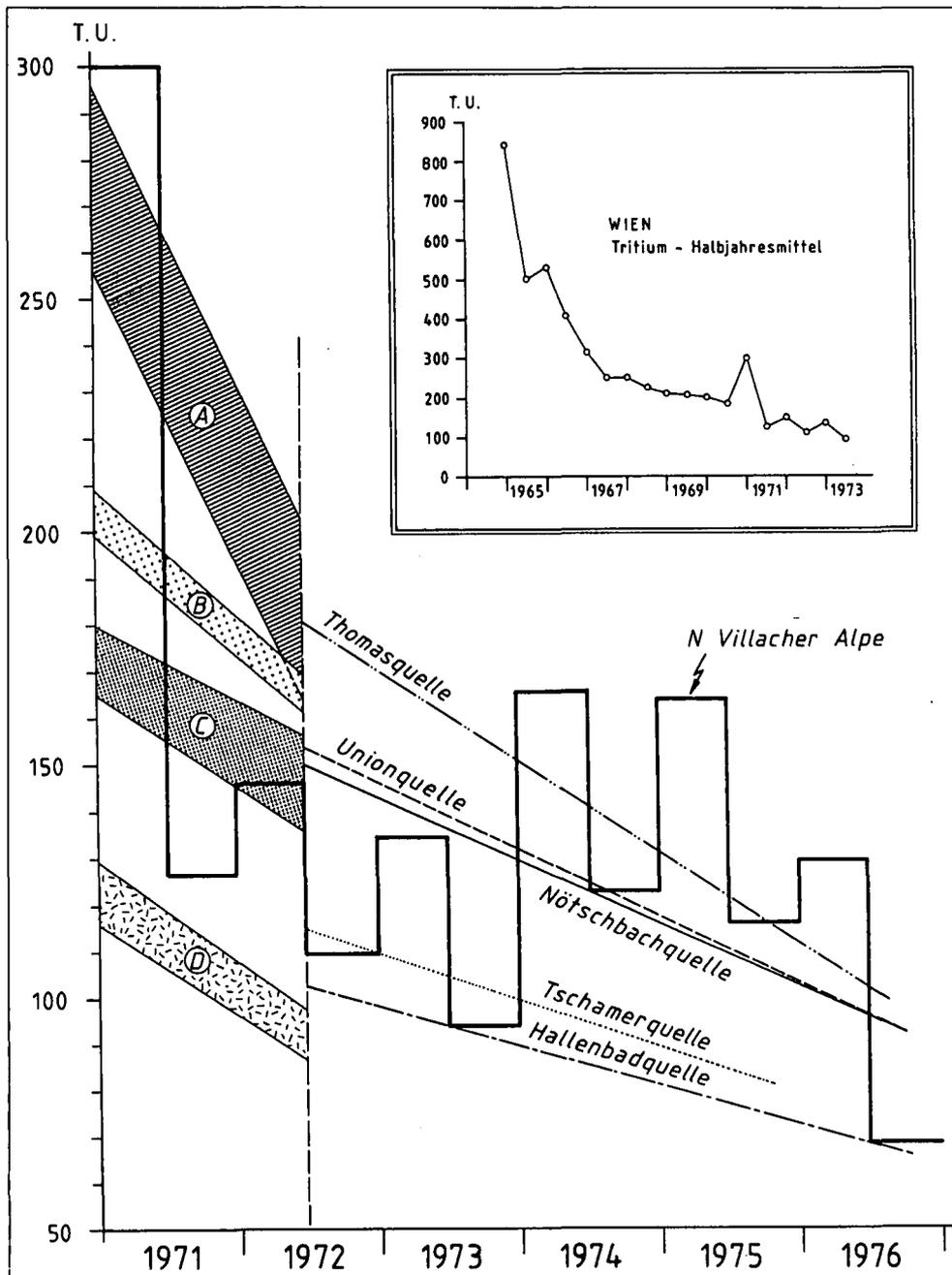


Abb. 5. Trends des Tritiumgehaltes verschiedener Quellwässer.

jeweils um Quellen handelt, deren Einzugsgebiet vornehmlich in anisichen Dolomiten liegt, wo das unterirdische Wasser aufgrund der eingeschränkten Verkarstung länger im kleinscharigen Kluftnetz verbleibt. Im Gegensatz dazu ist die Speicherfähigkeit im Einzugsgebiet des Kaltbaches gering (Abb. 5, Gruppe C), der niedrige Tritiumgehalt verweist auf ein schnelles Durchströmen des Karstkörpers. Zwischen diesen beiden Gruppen ist ein gemischter Bulk situiert (Abb. 5, Gruppe B), dem u.a. die Quellen im Raum Heiligengeist angehören, deren Austritte durch die Lage der Moränen bedingt sind. Hier dürfte keine tiefreichende Entwässerung vorliegen. Wiederum herausfallend sind die Warmbader Thermalquellen (Abb. 5, Gruppe D), deren Tritiumkonzentrationen deutlich unter jenen des Niederschlages liegen. Dies muß wiederum als Indiz verstanden werden, daß länger gespeichertem Wasser eine rezente Komponente beigemischt wird.

6.2. Sauerstoff-18-Messungen

Die stabilen Isotope Deuterium und Sauerstoff-18 unterliegen verschiedenen Effekten. Für die gegebene Fragestellung ist der Temperatureffekt von Bedeutung, der auch infolge der Konzentrationsabnahme von ^2H und ^{18}O mit der Verminderung der Kondensationstemperatur im Zuge der Temperaturabnahme mit der Seehöhe auch als Höheneffekt wirksam werden kann. Unter der Voraussetzung

von Serienuntersuchungen, die eine gesicherte Mittelbildung zulassen, kann dieser Höheneffekt für die Berechnung der mittleren Höhe von Quelleinzugsgebieten verwendet werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind zumindest relative Angaben über Höhenlage von Einzugsgebieten und unterirdische Speicherung möglich. Ein Beispiel dafür ist die Schwankungsbreite im jahreszeitlichen Verlauf, wie sie im oberen Abschnitt von Abb. 6 dem mittleren ^{18}O -Gehalt der Quellwässer gegenübergestellt ist. Wie zu erwarten, ist das höchstliegende Einzugsgebiet der Nötschbachquelle (V 34) eigen, am niedrigsten liegen die Einzugsgebiete der Reßmannquelle von Pogöriach (V 131) und der Römerquelle. Die starke tektonische Zerlegung der Dobratsch-Gipfeldecke läßt zusammen mit dem niedrigen ^{18}O -Gehalt ein Zurückreichen des Einzugsgebietes der Nötschbachquelle bis in die Hochregionen des Massivs vermuten. Die Reßmannquelle hingegen dürfte ausschließlich den Hauptdolomit der Basisdecke entwässern, ihr Einzugsgebiet dürfte nicht über die Deckengrenze hinwegreichen, die durch tonige Komponenten des Raibler Niveaus gekennzeichnet ist. Somit ergibt sich für diese Quelle eine ziemlich eindeutige Abgrenzung ihres Einzugsgebietes in den unteren Hangbereichen am Nordostabfall des Gebirgsstockes.

Morphologisch gut abgegrenzt dürfte auch das Einzugsgebiet der Römerquelle sein, die aus der Pungarterscholle entwässert. Schwierig einzustufen sind die Thermalquellen von Warmbad Villach, da die beiden Mischungskomponenten (Heiß- und Kaltwasser) in ihren Einzugsgebieten noch zu wenig bekannt sind.

Ähnlich wie für die mittlere Höhenlage von Quelleinzugsgebieten können Hinweise auch auf die unterirdische Speicherung – in diesem Fall durch das Ausmaß und die Art der jahreszeitlichen Schwankungen – gegeben werden. Betrachtet man vorerst lediglich die Schwankungsamplitude (Abb. 6), so liegt der größte Teil der Quellen zwischen 0,6 und 1,0 ‰. Interessant dabei ist, daß auch die Warmbader Thermalquellen Schwankungen im ^{18}O -Gehalt unterworfen sind. Dies würde eine zeitlich unterschiedliche Kaltwasserbeimengung widerspiegeln, wenn man davon ausgeht, daß der Kaltwasseranteil aus dem seichten Karst stammt. Diese dynamischen Vorgänge dürften wohl die Isotopenkonzentrationen beeinflussen, weniger aber die Wassertemperaturen.

Die große Schwankungsamplitude bei der Römer- und Reßmannquelle weist auf eine geringe unterirdische Speicherung hin. Die starke Verkarstung des Hin-

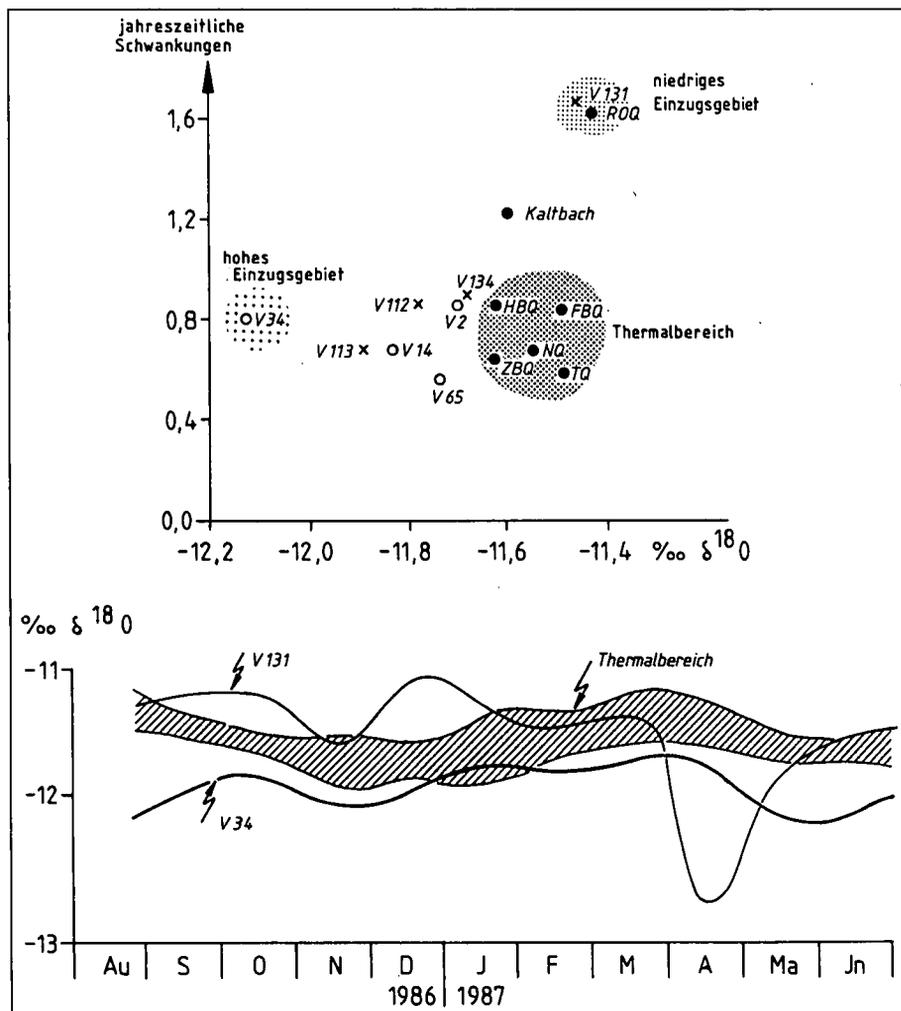


Abb. 6. Mittelwerte und Schwankungsverhalten im ^{18}O -Gehalt von Wässern der Villacher Alpe.

terlandes der Römerquelle (Pungart) bewirkt eine schnelles Abströmen von Infiltrationswässern. Im Einzugsgebiet der Reßmannquelle sind die wasserwegigen Zonen nur geringfügig überlagert, so daß sich Oberflächeneinflüsse rasch auswirken können.

Die Schneeschmelze ist zweifellos ein wichtiger Faktor für die Aussagekraft hydrologischer Parameter im Hinblick auf das Speicherverhalten von Aquiferen. Dies trifft im besonderen für die Interpretation von ¹⁸O-Ganglinien zu, weil hier die Auswirkungen noch durch den Temperatureffekt verstärkt werden.

Der untere Abschnitt der Abb. 6 bietet die Darstellung von einigen diesbezüglichen Beispielen. Die ¹⁸O-Bandbreite der Thermalwässer von Warmbad Villach läßt erahnen, daß es wohl kleine Unterschiede in der Alimention einzelner Quellen gibt, die Auswirkungen der Schneeschmelze aber sehr spät auftreten und überdies nur schwach angedeutet sind (Oktober – Dezember 1986).

Bei der Nötschbachquelle wirkt sich die Schneeschmelze in den Hochlagen erst im Mai/Juni aus, in einer Zeit, wo die Schüttung der Quelle ihre Spitze bereits längst überschritten hat. Sehr markant, kurzzeitig und bereits im April erreichen die Schneeschmelzwässer die Reßmannquelle, was neben der schlechten Speicherung auch als Hinweis für ein Einzugsgebiet zu werten ist, das nicht weit hinaufreicht.

7. Durchführung eines Markierungsversuches

Am 17. Juni 1987 wurde aufbauend auf die bis dahin gewonnenen Erkenntnisse ein Markierungsversuch durchgeführt, wobei vier Eingabestellen auf verschiedenen Niveaus der Villacher Alpe mit verschiedenen Farbtracern beschickt wurden. Die Ergebnisse bestätigen die rasche Abflußdynamik der Karstquellen, die im Hinblick auf mögliche Schutz- und Schongebiete für die Trinkwasserquellen von Bedeutung ist. Abb. 7 gibt eine Übersicht über Eingabestellen, Beprobungspunkte und die nachgewiesenen Verbindungen.

Die beiden großen Quellen im E des Untersuchungsgebietes, die Union- und Thomasquelle, zeigen eine Verbindung mit der Eingabestelle auf der Roßtratte, während Römerquelle und Studenzahöhle aus dem Bereich des Punart alimentiert werden. Die Nötschbachquelle weist eine Verbindung mit der Eingabestelle im Gipfelbereich der Villacher Alpe auf. Für die Quellen V 2, V 14, V 128, V 131 und V 134 konnte kein Nachweis eines Tracerdurchganges erbracht werden.

Tabelle 2 zeigt jeweils das Erstaufreten, den Maximaldurchgang und den Schwerpunktdurchgang der Markierungsmittel in den Beobachtungsstellen aufgrund der Direktbeprobung, eingeklammert die Tage nach der Einspeisung.

Tabelle 2.
Zeitpunkt des Tracernachweises.

Meßstelle	Erstaufreten	Maximum	Schwerpunkt	Tracer
V 112	870623 (6)	870625 (8)	870629 (12)	Eosin
V 113	870623 (6)	870624 (7)	870629 (12)	Eosin
V 34	870619 (2)	870619 (2)	870702 (15)	Uranin
ROQ	870619 (2)	870620 (3)	-	Pyranin
STH	870619 (2)	870620 (3)	-	Pyranin

Aus den Zeitpunkten der Farbnachweise (Maxima und Schwerpunkt) und den Entfernungen zwischen Eingabepunkten und Beprobungstellen errechnen sich die in Tabelle 3 aufgelisteten Wegzeiten bzw. Abstandsgeschwindigkeiten.

Tabelle 3.
Verbindungsstrecken und Abstandsgeschwindigkeiten [m/Tag].

Wegstrecke	Entfernung	Abstandsgeschwindigkeit [m/Tag]		Schwerpunkt
		Erstaufreten	Maximum	
R - V 112	ca. 9500 m	1597	1195	789
R - V 113	ca. 9500 m	1597	1367	790
G - V 34	ca. 2500 m	1390	1390	169
P - STH	ca. 1600 m	779	524	-
P - ROQ	ca. 2000 m	974	655	-

Nach den Ergebnissen des Markierungsversuches lassen sich aufgrund des eindeutigen Tracernachweises von verschiedenen Einspeisungsstellen in bestimmten Quellen dazugehörige Einzugsgebiete klar abgrenzen.

Die Union- und Thomasquelle entwässern einen Großteil der Nordostflanke der Villacher Alpe. Der Bereich dehnt sich zumindest bis zur Roßtratte aus, von wo eine gesicherte Verbindung nachgewiesen werden konnte, wobei durch die dominante Waagtalstörung die Hauptwässerungsrichtung tektonisch vorgezeichnet ist. Die laterale Ausdehnung des Aquifers kann insofern abgegrenzt werden, daß weder im Weißenbach noch in der Fellach Spuren des auf der Roßtratte eingespeisten Tracers aufgetreten sind, so daß diese beiden Gerinne als Vorfluter nicht in Frage kommen.

Bei den Quellen zwischen Heiligen Geist und dem Hundsmarhof, die an den Kontakt Wettersteinkalk – Carditaschichten gebunden sind, traten ebenfalls keine Tracerdurchgänge aus dem Bereich der Roßtratte auf, so daß diesen, wie auch die Langzeituntersuchungen dokumentieren, ein lokales Einzugsgebiet zwischen Kasermaiß und Wabenkopf zugeschrieben werden kann.

Das Einzugsgebiet der Nötschbachquelle reicht bis in die Gipfelregionen der Villacher Alpe, wobei eine gesicherte Verbindung mit der Einspeisungsstelle östlich des Ludwig Walter Hauses besteht. In der etwas weiter westlich austretenden Leiningerquelle dagegen konnte dieser Tracer nicht nachgewiesen werden. Das Einzugsgebiet dieser Quelle liegt großteils in dem dort etwas tiefer aufgeschlossenen Wettersteindolomit.

Die Quellen im W und S der Villacher Alpe zeigen keine Verbindungen zu den Einspeisungsstellen, so daß ihre lokalen Einzugsgebiete in den Randbereichen, im S vor allem in den Schotter- und Verwitterungsmassen an den Flanken des Dobratsch, zu suchen sind.

Klar definiert ist das Einzugsgebiet der Römerquelle und des Karstüberlaufes der Studenzahöhle, die die Hochfläche des Pungart entwässern. Da die Schüttung der Römerquelle und der nur zeitweise aktiven Studenzahöhle allein für das orographische Einzugsgebiet viel zu gering ist und überdies von der Eingabestelle am Pungart keine Verbindung zu den großen Quellen im E nachgewiesen werden konnte, ist anzunehmen, daß ein Großteil des infiltrierenden Wassers in große Tiefen gelangt und später als Thermalwasser in den warmen Quellen des Warmbader Bezirkes wieder zutage tritt.

Eine ursprünglich erwartete Anreicherung der Quelle Möltschach aus der Hochfläche des Pungart fand durch

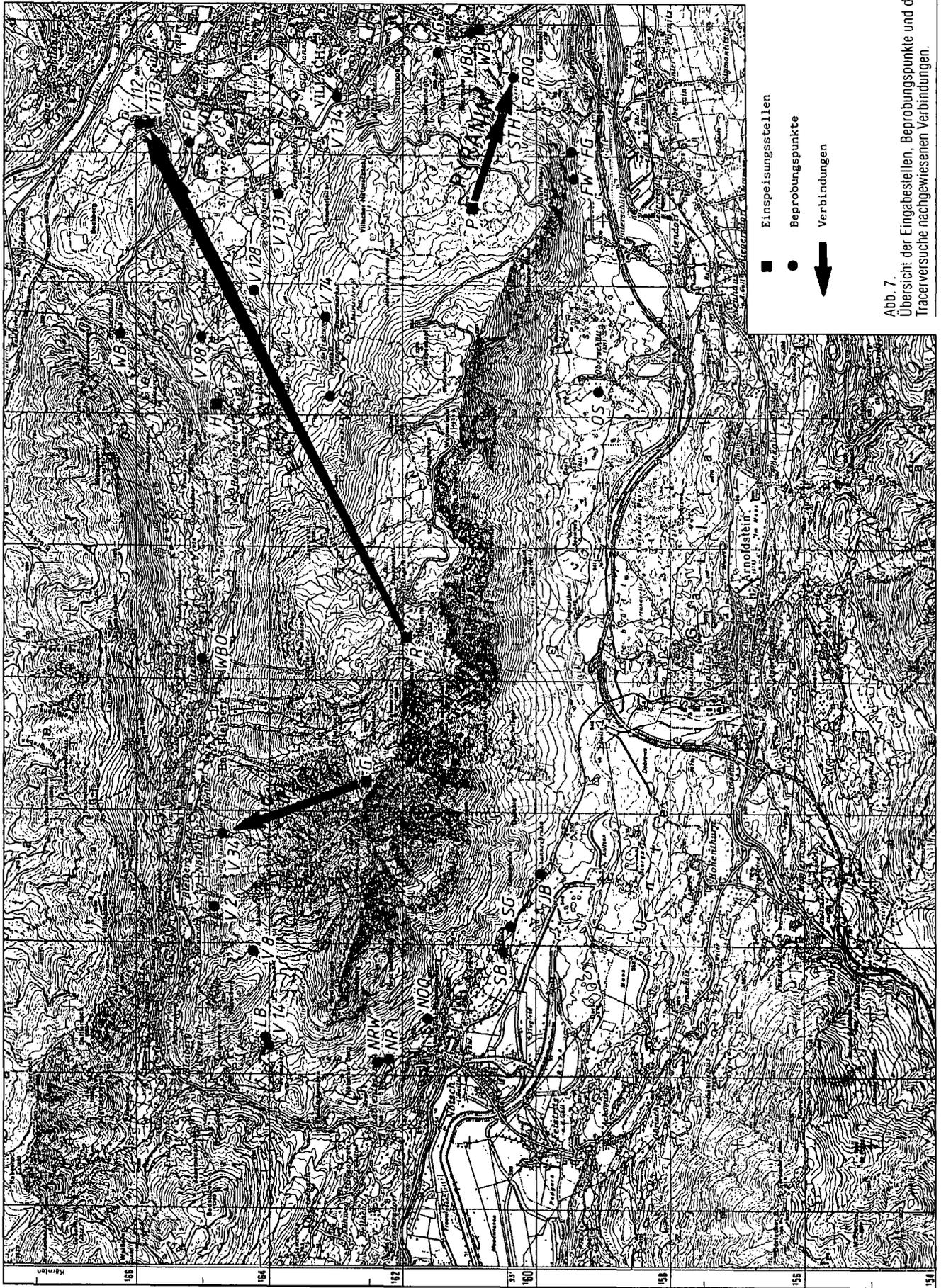


Abb. 7.
Übersicht der Eingabstellen, Beprobungspunkte und der durch Tracerversuche nachgewiesenen Verbindungen.

den Markierungsversuch keine Bestätigung. Vielmehr ist ihr Einzugsgebiet in den hier sehr mächtigen quartären Ablagerungen zu suchen.

Das bereits in PROBST & ZOJER (1988) klar definierte Einzugsgebiet der Ressmannquelle in dem dort aufgeschlossenen Hauptdolomit ist auch durch den Markierungsversuch insofern bestätigt, als dort keiner der eingespeisten Tracer auftauchte.

8. Grundwasserverhältnisse im Raum Warmbad Villach

Das Grundwasserfeld, das sich in Warmbad Villach zwischen den Ostabhängen der Villacher Alpe im W, der Graselitzen im S und der Gail im E befindet, wird neben der direkten Infiltration hauptsächlich von Wässern aus den Ostausläufern der Villacher Alpe angereichert. Hierbei kommt es zu einem Abströmen von höher temperiertem Mischwasser in örtlich unterschiedlicher Menge und Wassertemperatur, bedingt durch die Inhomogenität des Grundwasserleiters. Die Richtungsänderung der Gail von W-E auf S-N bei der Enge von Müllnern ist tektonisch bedingt. Diese Schmalstelle verhindert auch eine beträchtliche Anreicherung des Grundwassers aus Gailbegleitwässern. Dies bestätigt auch die vorher getroffene Annahme, daß der Hauptanteil des Grundwassers von der Villacher Alpe herrührt.

Für die Beobachtung des Grundwassers standen 18 Pegel des Hydrographischen Dienstes Kärnten, vier Hausbrunnen, 13 Pegel und drei Brunnen der ÖBB, zwei Bohrungen von seismischen Untersuchungen und eine Bohrung, die in Verbindung mit einem Neubau an der Kreuzung Judendorfer Straße – Warmbader Straße abgeteufelt wurde, zur Verfügung. An diesen 41 Beobachtungsstellen wurden zwischen dem 9. 3. 1988 und dem 29. 6. 1988 einmal wöchentlich der Grundwasserspiegel sowie die Temperaturverteilung in der Wassersäule im Pegelrohr bzw. Brunnen, gemessen. Damit sollte der Einfluß der Schneeschmelze und in weiterer Folge die Auswirkungen auf das Grundwasser erfaßt werden.

Aus der Beobachtung ließen sich markante Maxima und Minima des Grundwasserstandes erkennen. Für den Zeitpunkt des Grundwasserhöchststandes am 20. 4. 1988 und des Grundwassertiefststandes am 23. 3. 1988 wurden Grundwasser- und Temperaturgleichenkarten ange-

fertigt. Die Grundwassergleichenkarte zeigt ein Gefälle des Grundwasserspiegels vom Napoleonsiesenabhang Richtung E. In der Nähe der Gail ändert sich die Richtung des Wasserspiegels. Dort schwenkt er parallel zur Gail in Richtung N um. Das stärkste Gefälle zeigt der Grundwasserspiegel nahe den Napoleonwiesenabhängen und aus dem Hungerbach- bzw. Maibachgraben.

Das starke Gefälle des Grundwasserspiegels nahe den Napoleonwiesenabhängen und im Hungerbachgraben sowie das Schwanken des Grundwasserspiegels in letzterem Graben bis zum Zutagetreten des Wassers in der Bohrung BH und das Anspringen der Maibachquellen lassen darauf schließen, daß das Grundwasserfeld Warmbad seine Anreicherung, zumindest größtenteils, in diesen Bereichen erfährt.

Abschließend sei erwähnt, daß den Untersuchungen im Bereich der Villacher Alpe im Zusammenhang mit dem Schutzbedürfnis der Trinkwasserquellen und insbesondere des Thermalwassers große Bedeutung zukommt. Die Interpretation der Ergebnisse zeigt die schnelle Reaktion des Systems auf Niederschlagsereignisse und die Schneeschmelze, so daß die Reinhaltung des Einzugsgebietes der Quellen ein Gebot erster Stunde ist. Dies besonders im Hinblick auf die Qualität des Trinkwassers. Ein zweiter Punkt ist die Erhaltung und der Schutz des Grundwassers im Vorfeld der thermalen Quellaustritte. Eine Absenkung des Grundwasserfeldes könnte unter Umständen eine Minderung oder gar den Verlust des warmen Wassers bedeuten. Daher muß eine laufende Beobachtung dieser Grundwasserverhältnisse erfolgen. Letztlich liegt die Durchsetzung und Wahrung der Schutzbestimmungen bei der Behörde, die hier sicher einen harten konsequenten Weg einschlagen muß.

Literatur

- PROBST, G. & H. ZOJER, (1988): Karstwasserreserven der Villacher Alpe, KA-24b/Teil II – Endbericht. – Unveröff. Bericht, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Forschungsgesellschaft Joanneum Ges.m.b.H., 49 S., Anhang, Graz.
- PROBST, G., POLTNIG, W., NEUBAUER, E.A.K., SCHEFZIK, G. & ZOJER, H. (1989): Karstwasserreserven der Villacher Alpe, KA-24b/Teil III – Endbericht. – Unveröff. Bericht, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Forschungsgesellschaft Joanneum Ges.m.b.H., 59 S., Anhang, Graz.
- ZOJER, H. & Haider, H. (1986): Karstwasserreserven der Villacher Alpe, KA-24BbTeil I – Endbericht. – Unveröff. Endbericht, Institut für Geothermie und Hydrogeologie, Forschungsgesellschaft Joanneum Ges.m.b.H., 71 S., Graz.