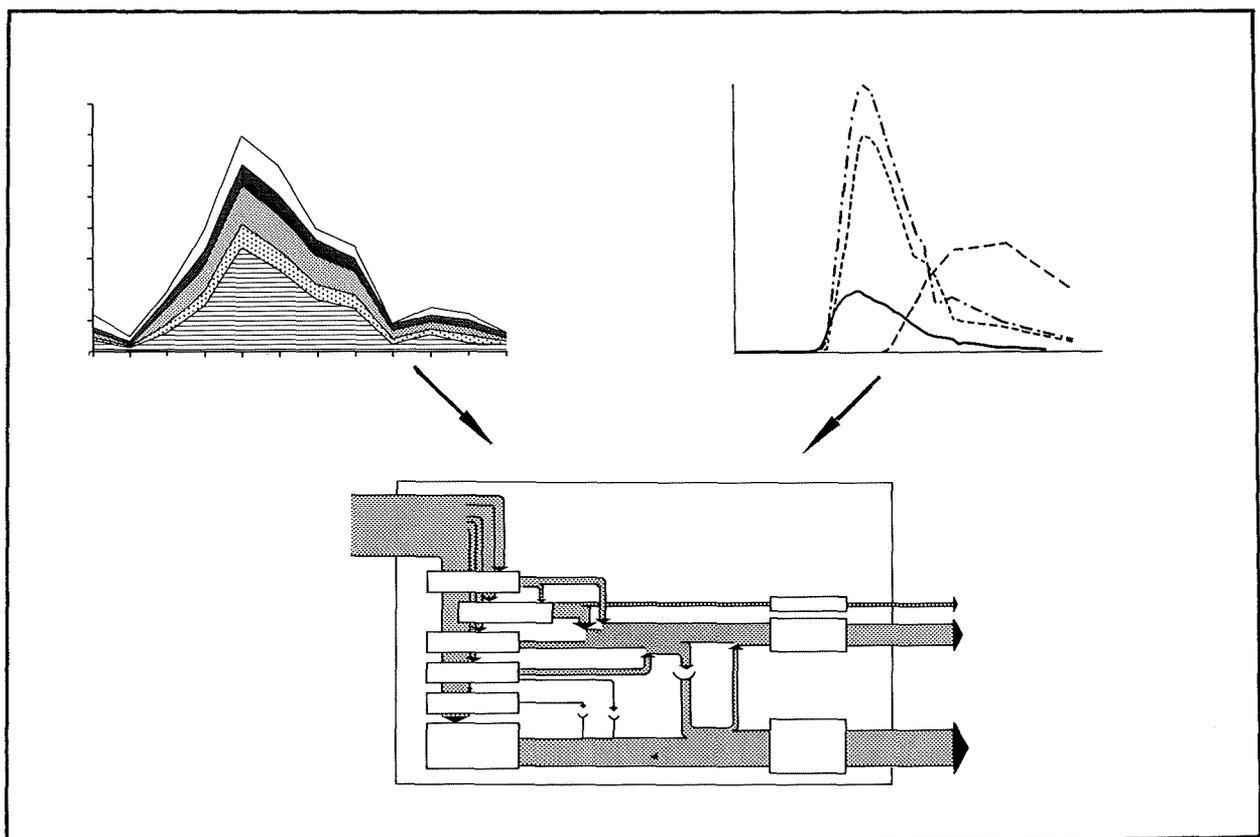


Robert Attinger

TRACERHYDROLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IM ALPSTEIN

Methodik des kombinierten Tracereinsatzes für die hydrologische Grundlagenerarbeitung in einem Karstgebiet



Die Arbeit ist finanziert worden durch die
Kantone St. Gallen, Appenzell Innerrhoden
und Ausserrhoden

Der Druck wurde durch die folgenden Institutionen
unterstützt:

Arbeitsgemeinschaft Geographica Bernensia
Stiftung Marchese Francesco Medici del Vascello

VORWORT

Die Anfänge der Tracerhydrologie, im besonderen der Markierversuchs-Technik, liegen in der Karsthydrologie. Entsprechend der in den letzten Jahren zunehmenden Bedeutung des Porengrundwassers für die Wasserversorgung verlagerten sich die Anwendungsschwerpunkte in diesen Bereich, in neuester Zeit auch in die klüftigen, nichtkarstigen Festgesteinsaquifere. Die methodische Weiterentwicklung der Tracerverfahren im Karst ist dabei etwas vernachlässigt worden. Mit der vorliegenden Dissertation von Dr. R. Attinger liegt nun wieder eine eingehende Behandlung dieses Themas vor.

Ich danke dem Verfasser und allen die dieses Projekt unterstützt haben herzlich für Mit- und Zusammenarbeit.

Bern, 30. Juni 1988

Ch. Leibundgut

VORWORT DES VERFASSERS

Jede wissenschaftliche Arbeit hat immer einen inhaltlichen Aspekt, der seinen Niederschlag in der abschliessenden Publikation findet, und einen persönlichen, der dabei unberücksichtigt bleibt. Gerade diese persönlichen Erlebnisse sind aber für den Bearbeiter von entscheidender Bedeutung, ob der entsprechende Zeitabschnitt als positive oder negative Erfahrung abgelegt wird. Auch aus dieser persönlichen Sicht war die Arbeit im Alpstein ein Erfolg. Viele haben dazu beigetragen. Ich hoffe, dass auch Sie einige gute Erinnerungen an die Zusammenarbeit mitnehmen können.

Bern, 28. Mai 1988

R. Attinger

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	I
INHALTSVERZEICHNIS	II
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	IV
VERZEICHNIS DER TABELLEN	IX
ABKUERZUNGEN	XI
ZUSAMMENFASSUNG	XII
1. EINLEITUNG	1
2. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	4
3. UNTERSUCHUNGSGEBIET	7
3.1. Lage, Topographie	7
3.2. Geologie, Tektonik	8
3.3. Klima	13
3.4. Tourismus, Alpwirtschaft	15
4. KONZEPT UND THEORETISCHE GRUNDLAGEN	17
4.1. Einleitung	17
4.2. Das Karstwassersystem	17
4.2.1 Modellvorstellung der Karstwasser- zirkulation	17
4.2.2 Der Stofftransport in Karstwasser- systemen	21
4.2.3 Entwicklung	24
4.3. Untersuchungsansatz	26
4.4. Untersuchungsprogramm	29
5. MESSNETZE UND DATENERHEBUNG	31
5.1. Karsthydrographische Aufnahmen	31
5.2. Abfluss	31
5.2.1 Abflussmessstationen	31
5.2.2 Eichung, Auswertung	32
5.2.3 Ablespegel	35
5.3. Untersuchungen der Wasserbeschaffenheit	36
5.4. Untersuchung der Bergseen	38

5.5. Markierversuche	38
5.5.1 Einspeisungen	38
5.5.2 Verwendete Markierstoffe	39
5.5.3 Probenahme	40
5.5.4 Analyse	41
5.5.5 Berechnete Kenngrössen	43
6. QUELLEN UND GEWAESSERNETZ	46
6.1 Nordwesthang	46
6.2 Oberes Toggenburg	46
6.3 Rheintal	48
6.4 Gebiet Appenzell	49
7. UNTERSUCHUNG DER BERGSEEN	50
7.1. Topographie, Geomorphologie und Hydrographie	50
7.2. Hydrologie	56
7.3. Thermik	60
7.4. Wasserbeschaffenheit	61
7.5. Hydrologische Bedeutung und Probleme der Alpsteinseen	63
8. ABFLUSS	66
8.1. Jahresgang und mittlerer Jahresabfluss	66
8.2. Ermittlung der Einzugsgebietsgrösse	69
8.2.1 Vorgehen	69
8.2.2 Mittlerer Jahresabfluss einer langjährigen Periode	71
8.2.3 Mittlere Abflussspende	72
8.2.4 Berechnung der Einzugsgebietsfläche	75
8.3. Speicherverhalten	77
8.3.1 Dauerkurve	77
8.3.2 Rezessionsverhalten	79
8.4. Abflussverhältnisse einzelner Gebiete	83
8.4.1 Wasserauen	83
8.4.2 Oberes Toggenburg/Alt St. Johann	85
9. AUSWERTUNG NATUERLICHER TRACER(WASSERBESCHAFFENHEIT)	89
9.1. Uebersicht	89
9.1.1 Allgemeine Charakterisierung der Wässer	89
9.1.2 Hauptkomponentenanalyse	93
9.1.3 Kalk-Kohlesäure-Gleichgewicht	96

9.2. Untersuchung einzelner Quellen	99
9.2.1 Interpretation der Ganglinien von Temperatur Leitfähigkeit und Schüttung	100
9.2.2 Statistische Beziehung Schüttung- -Wasserbeschaffenheit	105
9.3. Isotopenuntersuchungen	108
10. EINSATZ KUENSTLICHER TRACER 1986	110
10.1. Hydrometeorologische Bedingungen	110
10.2. Einspeisungen	111
10.3. Probenahme	113
10.3.1 Automatische Probenahmegeräte	113
10.3.2 Aktivkohleproben	114
10.3.3 Handproben	115
10.4. Resultate	115
10.4.1 Einspeisung Schwaderloch	115
10.4.2 Einspeisung Fälensee	118
10.4.3 Einspeisung Oehrligrueb	119
10.4.4 Einspeisung Ebenalp	122
10.4.5 Einspeisung Reslen	125
10.4.6 Einspeisung Seealpsee	126
10.5. Frühere Markierversuche im Gebiet	127
11. EINSATZ KUENSTLICHER TRACER 1987	130
11.1. Hydrometeorologische Bedingungen	130
11.2. Einspeisungen	130
11.3. Probenahme	133
11.3.1 Automatische Probenahmegeräte	133
11.3.2 Aktivkohleproben	133
11.3.3 Handproben	134
11.4. Resultate	134
11.4.1 Einspeisung Säntisgipfel	134
11.4.2 Einspeisung Schwinde Stein	137
11.4.3 Einspeisung Zwinglipass	140
11.4.4 Einspeisung Schwinde Risi	142
11.5. Frühere Markierversuche im Gebiet	144

12. GRUNDZUEGE DER HYDROLOGIE DES ALPSTEINS UND BEURTEILUNG	
(Synoptische Auswertung der Resultate)	145
12.1. Allgemeine Fliessverhältnisse	145
12.1.1 Fliessrichtung	145
12.1.2 Abstandsgeschwindigkeit	146
12.1.3 Dispersion	150
12.2. Abgrenzung der Einzugsgebiete	152
12.3. Vorgehen zur Beurteilung von Quellen und Einzugsgebieten	154
12.3.1 Strukturmodelle von Quelleinzugs- gebieten	154
12.3.2 Ablauf der Beurteilung	155
12.4. Allgemeine Beurteilung von Karstquellen im Alpstein	157
12.5. Die Beurteilung ausgewählter Quelleinzugs- gebiete	160
12.5.1 Gätterli-Wasserauen und Schwendebach	160
12.5.2 Tschuder-Wasserauen	162
12.5.3 Brüelbach-Pfannenstiel	163
12.5.4 Mühlebach-Sennwald	164
12.5.5 Quellen in Alt St. Johann	165
12.5.6 Quellen in der Thurwies und im Lauiboden	166
13. SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK	168
LITERATUR	170

Beilage: Hydrogeographische Karte des Alpsteins

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abb.	3. 1: Lage des Untersuchungsgebietes	7
	3. 2: Geologisch-tektonische Uebersicht	8
	3. 3: Geologisches Querprofil	9
	3. 4: Schichtreihe und Verkarstungsfähigkeit	10
	3. 5: Windrose Säntis	14
	3. 6: Höhenabhängigkeit der Temperatur	14
	4. 1: Karstwasserfliessen in Spalten und "Blöcken"	18
	4. 2: Schematische Darstellung eines Karst- wassersystems	20
	4. 3: Stofftransport in Karstwassersystemen	22
	4. 4: Konvergenzansatz	27
	4. 5: Untersuchungsablauf	29
	4. 6: Zeitplan	30
	7. 1: Struktur des Fälenseebodens bei der Schwinde	50
	7. 2: Isobathenkarte des Fälensees	51
	7. 3: Bodenstruktur des Fälensees	53
	7. 4: Geomorphologische Karte des Seealpsees	54
	7. 5: Schwinde im Seealpsee	55
	7. 6: Seespiegelschwankung des Säntisersees	59
	7. 7: " " Fälensees	59
	7. 8: Temperaturstruktur von Fälen- und Seealpsee	60
	7. 9: Sauerstoffwerte	62
	8. 1: Abflussregimes im Alpstein (15-Tagesmittel) 1986	67
	8. 2: Abflussregimes im Alpstein (15-Tagesmittel) 1986/87	68
	8. 3: Verfahren zur Bestimmung der Einzugs- gebietsflächen	71
	8. 4: Sommer-Niederschlag und Stationshöhe	73
	8. 5: Höhenabhängigkeit der Abflussspende	75
	8. 6: Dauerkurven von Oberflächengewässern	78
	8. 7: Dauerkurven von Quellen	78
	8. 8: Drainage- und Speicherraumanteil (Schematischer Darstellung)	80

Abb. 8. 9:	Auslaufkurven der Station Schwendebach-EW	81
8.10:	Uebersichtsskizze Wasserauen	84
8.11:	Abflussanteile der Station Schwendebach-Ditzes	84
8.12:	Jahresgang des Abflusses im oberen Toggenburg 1986	85
8.13:	Abflussanteile der Station Thur-Bürgerheim	86
8.14:	Grundwasserganglinien im oberen Toggenburg	87
9. 1:	Häufigkeitsverteilung der Leitfähigkeit	89
9. 2:	Kumulierte Eigenwerte der Faktoren	94
9. 3:	Faktorenmuster	95
9. 4:	Aufteilung der Einheitsvarianz der Variablen auf die Faktoren	96
9. 5:	Mischungskorrosion	98
9. 6:	Ganglinien von Schüttung, Temperatur und Leitfähigkeit, Gätterli-Wasserauen	100
9. 7:	Ganglinien von Temperatur und Leitfähigkeit, Mühlebach-Sennwald	101
9. 8:	Ganglinien von Schüttung, Temperatur und Leitfähigkeit, Tschuder-Wasserauen	102
9. 9:	Ganglinien von Abflussmenge, Temperatur und Leitfähigkeit, Pfannenstiel-Brülisau und Brüelbach	103
9.10:	Ganglinien von Schüttung, Temperatur und Leitfähigkeit, Quellen in Alt St. Johann	104
9.11:	Häufigkeitsverteilung der Leitfähigkeit, Quellen in Alt St. Johann	105
10. 1:	Probenahmeintervall der automatischen Probenahmegeräte 1986	114
10. 2:	Einspeisung Schwaderloch, Durchgangskurve Pfannenstiel-Brülisau	116
10. 3:	Einspeisung Schwaderloch, Durchgangskurve Brüelbach-Pfannenstiel	116
10. 4:	Einspeisung Fälensee, Durchgangskurve Mühlebach-Sennwald	118
10. 5:	Einspeisung Oehrligrueb, Durchgangskurve Berndlibach	120
10. 6:	Quellsituation Berndli	120
10. 7:	Einspeisung Oehrligrueb, Durchgangskurve Tschuder-Wasserauen	121
10. 8:	Einspeisung Ebenalp, Durchgangskurve Tschuder-Wasserauen	122

Abb. 10. 9:	Untersuchte Wasseraustritte bei Wasserauen	124
10.10:	Einspeisung Reslen, Durchgangskurve Schwendebach-EW	126
10.11:	Einspeisung Seealpsee, Durchgangskurve Schwendebach-EW	127
10.12:	Einspeisung Säntisersee 6.12.1921, Durch- gangskurven Mühlebach-Sennwald und Pfannenstiel-Brülisau	128
11. 1:	Höhlenplan Oberschärenschacht	132
11. 2:	Probenahmeintervalle der automatischen Probenahmegeräte 1987	133
11. 3:	Einspeisung Säntisgipfel, Durchgangskurve Säntisthur-Laut	135
11. 4:	Tracerdurchgänge der Einspeisung Säntis	135
11. 5:	Einspeisung Stein, Durchgangskurve Säntis- thur-Unterwasser	138
11. 6:	Einspeisung Stein, Durchgangskurve Mülibach-Alt St. Johann	138
11. 7:	Einspeisung Stein, Durchgangskurve Dorfbach-Alt St. Johann	139
11. 8:	Tracerdurchgänge der Einspeisung Stein	139
11. 9:	Einspeisung Zwinglipass, Durchgangskurve Säntisthur-Unterwasser	140
11.10:	Einspeisung Zwinglipass Durchgangskurve Dorfbach-Alt St. Johann	141
11.11:	Tracerdurchgänge der Einspeisung Zwinglipass	141
11.12:	Einspeisung Risi, Durchgangskurve Dorfbach-Alt St. Johann	142
12. 1:	Korrelation zwischen mittlerer Abstandsge- schwindigkeit und Abstand	148
12. 2:	Abweichung der gemessenen Tracerdurchgangs- kurven von Dispersionskurven	151
12. 3:	Regionale und lokale Karstwassersysteme	153
12. 4:	Ablaufschema der Beurteilung von Quellen	156

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tab. 3.1:	Uebernachtungszahlen einiger Gasthäuser	16
4.1:	Beurteilung der Verkarstungsfähigkeit nach chemischer Zusammensetzung	25
4.2:	Herkunft des Kohlendioxids	26
4.3:	Interpretationsmöglichkeiten der gemessenen Parameter	28
5.1:	Abflussmessstationen	33
5.2:	Ablespegel	35
5.3:	Ermittlung des mittleren jährlichen Abflusses bei Lattenpegeln	35
5.4:	Untersuchungen der Wasserbeschaffenheit	36
5.5:	Verwendete Tracer	40
7.1:	Kennwerte von Fälen- und Seealpsee	56
8.1:	Daten längerer Abflussmessreihen im Alpstein	70
8.2:	Abflusspenden für verschiedene mittlere Einzugsgebietshöhen	74
8.3:	Mittlere Jahresabflüsse und abgeschätzte Einzugsgebietsflächen	76
8.4:	Rezessionskoeffizienten und Speichervolumina	82
8.5:	Rezessionskoeffizienten aus verschiedenen Karstgebieten	82
9.1:	Korrelationsmatrix der hydrochemischen Daten	90
9.2:	Korrelation der Wasserbeschaffenheit zur Schüttung	106
9.3:	Partielle Korrelation der Wasserbeschaffenheit zur Schüttung	107
9.4:	Erklärter Varianzanteil eines multiplen Regressionsmodells	107
10.1:	Einspeisungen 1986 im Alpsteingebiet	111
10.2:	Quellgebiet Tschuder: Messwerte der Hochwasseraustritte am 7.7.1986	125
11.1:	Einspeisungen 1987 im Alpsteingebiet	131
11.2:	Zusammenstellung der Ausbringraten der Tracerdurchgänge im oberen Toggenburg	143
12.1:	Kennwerte der Tracerdurchgänge	147

Tab. 12.2: Fliessgeschwindigkeiten von Markierver- versuchen in verschiedenen Karstgebieten	148
12.3: Abstandsgeschwindigkeiten vom Fälensee zu Mühlebach-Sennwald unter verschiedenen hydrologischen Bedingungen	149

Durch die Gesamtschau der gewonnenen Daten ist es möglich ein Gesamtbild der Hydrologie des Alpsteins zu entwerfen. Auf Grund von Abflussdaten und Markierversuchen sind acht Einzugsgebiete räumlich ausgeschieden worden. Von einigen grösseren Quellen ist der heutige Kenntnisstand in Strukturmodellen zusammengefasst und kommentiert. Es ist auch möglich die Bedeutung der einzelnen Fliesswege im Karstwassersystem zu quantifizieren. Auf Grund der Modelle und der Einzugsgebietsabgrenzung erfolgt eine Beurteilung der Quellen und es kann auf die Gefahrenherde hingewiesen werden. Empfindliche Bereiche liegen besonders dort, wo eine intensivere Nutzung vorliegt, da praktisch im ganzen Gebiet mit sehr direkten Verbindungen zu Quellen gerechnet werden muss und eine genügende Filtration nur in wenigen Bereichen angenommen werden kann. Es sind deshalb insbesondere auch einmalige Schadenereignisse kritisch.

Die Einzugsgebietsabgrenzungen, die Gefahrenherde, die Hydrographie und die nachgewiesenen hydrologischen Verbindungen sind in der "Hydrogeographischen Karte des Alpsteins" (Beilage) zusammengestellt und damit als Planungsgrundlage gut greifbar.

Die vorliegenden Resultate belegen, dass mit dem gewählten Ansatz ein gangbarer Weg für die Erarbeitung von Grundlagen in einem geologisch komplexen Karstgebiet aufgezeigt werden konnte. Insbesondere der Bereich Wasserbeschaffenheit bedarf aber bei einer Uebertragung in andere Gebiete einer kritischen Ueberprüfung.

1. EINLEITUNG

Für die Untersuchung von Karstgebieten haben sich Markierversuche und kombinierte Tracermethoden gut bewährt und sich als unentbehrlich erwiesen. Der Karst gilt als das klassische Anwendungsgebiet der künstlichen Tracer. Die Erfahrungen in verschiedenen Gebieten zeigten aber, dass mit isolierten Einzeluntersuchungen nur unbefriedigende Resultate erzielt werden können. Um die Eigenheiten von Karstwassersystemen zu erfassen, ist der Einsatz verschiedener Untersuchungsmethoden, der kombinierte Einsatz von Tracern sinnvoll. Dank der Zusammenarbeit mit den kantonalen und lokalen Behörden konnte dieser Ansatz in der vorliegenden Untersuchung im Hinblick auf praktische Fragestellungen weiterentwickelt werden.

Im Rahmen des Projekts, das die Kantone Appenzell Innerrhoden, Ausserrhoden und St. Gallen in Auftrag gegeben haben und das der Bund finanziell unterstützt hat, konnte die vorliegende Dissertation erarbeitet werden. Dafür möchte ich den Auftraggebern meinen Dank aussprechen.

Die speziellen Charakteristika von Karstwassersystemen liefern praktisch überall, nicht nur im Alpstein, überraschende und unerwartete Ergebnisse. Dies macht hydrologische Untersuchungen in Karstgebieten immer wieder faszinierend. Die Unberechenbarkeit und die Grösse des Untersuchungsgebietes erschweren die Planung von Markierversuchen.

Eine sinnvolle Planung kann nur auf Grund entworfenener Hypothesen erfolgen; es muss aber auch mit unerwarteten Resultaten gerechnet werden. Deshalb erfordern Markierversuche kurzzeitig einen erhöhten Einsatz, der ohne tatkräftige Mithilfe von interessierten, hilfsbereiten KollegInnen nicht möglich ist. Auch die kontinuierlichen Messungen des Abflusses erfordern einen beträchtlichen Aufwand, der aber gewaltig erleichtert wird, wenn man auf die Unterstützung ortsansässiger, interessierter Kollegen und Behörden zählen kann.

Ich möchte es nicht unterlassen allen zu danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

- PD Dr. Ch. Leibundgut für die Betreuung der Arbeit.
- Klaus Dörig, Kant. Baudirektion AI, für die zur Verfügung gestellte Infrastruktur (Auto und Haus) und die Gastfreundschaft.
- Martin Fischer für die Betreuung der Abflussmessstationen und die Mithilfe bei Einspeisung und Probenahme.
- Thomas Reutimann für die gute Zusammenarbeit und schöne gemeinsame Feldtage.
- Heinz Schmid, Amt für Umweltschutz SG, und Kurt Schaller, Rheinbauleitung, für die Betreuung und den Bau der Abflussmessstationen im oberen Toggenburg.
- Stiftung Marchese Francesco Medici del Vascello für den namhaften Druckkostenbeitrag.
- B. Schudel, T. Wagner, D. Morgenthaler, M. Gossauer, A. Gees (alle Uni Bern) und N. Demut (Uni Freiburg) für die Mitarbeit bei Einspeisung und Probenahme.
- J. Petermann, T. Dervev (beide Büro naturaqua), C. Mathez, B. Born, M. Sansoni (alle Uni Bern) für die Mithilfe bei Einspeisungen.
- Höhlenforscher der Ostschweizerischen Gesellschaft für Höhlenforschung (OGH), insbesondere T. Aerne, H. Mühlestein, R. Scherrer, R. Läubli, für die Einspeisung am Zwinglipass, Mithilfe bei Probenahme und Unterlagen.
- Prof. Hötzl, B. Reichert und Studenten, Uni Karlsruhe, für die Mithilfe bei den Einspeisungen und die Ausleihe eines Fluorometers.
- U. Schotterer, Physikalisches Institut der Universität Bern, für die Durchführung der Isotopenmessungen.
- Dr. O. Lienert, Geologe, für die Begleitung des Projektes.
- H.U. Bleuer, technischer Dienst Geogr. Inst., für die Unterstützung bei der Gerätewartung.
- H.R. Wernli für die Betreuung im Labor.

- Dr. Th. Kempf, Geologe, für die Ueberlassung von Ergebnissen privater Felduntersuchungen.
- Prof. Dr. H. Heierli für die Einsicht in die Unterlagen von Dr. F. Saxer.
- Dr. M. Kobel, Geologe, für das Ueberlassen des Kommentarentwurfs zum geologischen Atlasblatt Nr.78, Säntis.
- Dr. A. Frutiger, EAWAG Dübendorf, für das Ueberlassen von Daten der Thur.
- K. Oberhäsli, Technische Betriebe Appenzell, für Daten und Unterstützung.
- R. Fässler, Wasserkorporation Rüte, für Daten und Unterstützung.
- W. Leuener, EW Sennwald, für Daten.
- Ph. Welti, P. Gsteiger und F. Siragusa für die geleistete Arbeit im Rahmen ihrer Hausarbeiten.
- Der Firma BASF AG, Ludwigshafen für die Bereitstellung des Fluoreszenztracers Rhodamin.

2. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Wir stehen vor der Tatsache, dass in unserem dichtbesiedelten und intensiv genutzten Lande die Nutzungskonflikte sich in den letzten Jahren verschärft haben. Im Alpsteingebiet ist ein solcher Nutzungskonflikt im Bereich Wasser - Landwirtschaft - Tourismus in einigen Fällen deutlich zu erkennen. Trotz neuer und verbesserter technischer Möglichkeiten der Wassernutzung, wie etwa dem vermehrten Aufschliessen von Porengrundwasservorräten, der Grundwasseranreicherung oder der Wasseraufbereitung, liegt es im Interesse der langfristigen Sicherung solcher Gebiete, dass die natürlichen Ressourcen erhalten bleiben. Die Sicherung betrifft sowohl die Mengen als auch die Qualität der Ressource. Die Problematik ist von der Wissenschaft und zum Teil auch von den Politikern erkannt und beispielsweise im Nationalen Programm Nr. 55, CH-MAB 6, "Sozio-ökonomische Entwicklung und ökologische Belastbarkeit im Berggebiet" behandelt worden (LEIBUNDGUT 1985).

Infolge zunehmender Intensivierung der landwirtschaftlichen und touristischen Nutzung im Alpsteingebiet geraten die vorhandenen Wasserressourcen, vor allem bezüglich ihrer Qualität, unter zunehmenden Druck. Der Vollzug des Bundesgesetzes über den Schutz der Gewässer gegen Verunreinigung (Gewässerschutzgesetz) wird nun in zweiter Priorität auch in diesen alpinen Gebieten an die Hand genommen. Gerade in Karstgebieten sind geeignete Massnahmen von ausserordentlicher Bedeutung, um eine nachhaltige Nutzung des Wassers zu gewährleisten. Die Alpsteinseen als augenfälligstes hydrologisches Element spielen dabei eine wesentliche Rolle. Sie bildeten auch den Anstoss für die Untersuchungen, da die Abwasserprobleme in den touristisch im Sommer intensiv genutzten Gebieten gelöst werden müssen.

Im Alpsteingebiet stehen wir vor der günstigen Ausgangslage, dass die Geologie ausserordentlich gut bekannt ist. Demgegenüber sind die hydrologischen Kenntnisse recht bescheiden. Insbesondere sind die wesentlichen Zusammenhänge unbekannt, da bisher nur Einzeluntersuchungen durchgeführt wurden. Obschon in diesen Einzeluntersuchungen teilweise wertvolle Grundlagen erarbeitet worden sind, reichen sie nicht aus, um die gestellten konkreten Fragen mit genügender Sicherheit zu beantworten (LEIBUNDGUT 1985:3).

In Erkenntnis dieser Tatsachen planten die zuständigen Behörden der Kantone Appenzell Ausserrhoden und Innerrhoden

sowie St.Gallen eine vertiefte Untersuchung zur Hydrologie des Alpsteingebietes (LEIBUNDGUT 1985:1). Diese hydrologischen Grundlagen sollten als Basis für gewässerschutztechnische Massnahmen verwendet werden können und es erlauben, die Gewässerschutzzonen zu präzisieren und die nötigen Auflagen zu verordnen. Im einzelnen geht es darum, die Einzugsgebiete der grösseren Quellen abzugrenzen, bzw. die einzelnen Karstwasserspeicher zu definieren und ihre Entwässerungsmechanismen zu erfassen. Diese Kenntnisse sollen in einer Form vorliegen, die für den Anwender direkt greifbar ist. Die Schwergewichte der Untersuchungen orientierten sich an konkreten, anstehenden Fragestellungen über hydrologische Verbindungen (LEIBUNDGUT 1985:2):

- Seealpsee / Gätteri-Wasserauen
- Ebenalp / Tschuder-Wasserauen
- Schwaderloch / Pfannenstiel-Brülisau
- Abwasserversickerung Säntisgipfel / Tosbachquellen
- Fälensee / Seealpsee
- Grundwasserinfiltrationen Wasserauen
- Gräppelensee / Quellen Alt St. Johann
- Infiltration Grundwasser bei Widen (Obertoggenburg)

Die gewonnenen Kenntnisse im regionalen Massstab sollen eine direkte Beantwortung von Fragestellungen auch im lokalen Bereich erlauben oder zumindest ein präzises Ansetzen von Zusatzuntersuchungen durch die betreffenden Behörden ermöglichen.

Das wissenschaftliche Problem bestand in der Erarbeitung und Ueberprüfung einer operationell einsetzbaren Untersuchungsmethodik für ein Karstgebiet mittlerer Grössenordnung (100 km²) im Hinblick auf praktische Fragestellungen. Der kombinierte Einsatz von Tracermethoden hat sich in gross angelegten Forschungsprojekten in Karstgebieten bewährt, wo direkte Untersuchungen des Aquifers wegen dem grossen Aufwand und nur punktuell gültiger Resultate versagen müssen. Es ist nun Aufgabe der Wissenschaft ein Instrumentarium für eine Problemlösung anzubieten. Dazu kann auf Kenntnisse einzelner Prozesse und auf ein Bündel von Untersuchungsmethoden zurückgegriffen werden.

Die methodischen Kenntnisse der Tracerverfahren, wie sie im vorliegenden Fall angewendet wurden, konnten anhand verschiedener Projekte in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen erarbeitet werden (MUELLER et al. 1980, BOEGLI 1981, MORFIS et al. 1986). Diese Arbeiten widmeten sich

insbesondere der Weiterentwicklung der Tracermethodik. Dementsprechend wurde der Synthese der Ergebnisse im Hinblick auf eine praktische Anwendung der Resultate wenig Gewicht beigemessen. In der vorliegenden Arbeit stand dieser Syntheseschritt im Vordergrund, der die Möglichkeit einer praxisorientierten Anwendung kombinierter Tracerverfahren in einem Karstgebiet der chorischen Dimension (nach LEIBUNDGUT 1982:22) aufzeigen sollte.

Es war das wissenschaftliche Ziel auf tracerhydrologischer Grundlage eine Methodik zu erarbeiten, die zur Beantwortung praxisbezogener Fragestellungen dienen kann. Aus einer Vielzahl von Forschungsansätzen und -methoden galt es ein optimales Methodenbündel auszuwählen und zu kombinieren, das es erlaubt die entscheidenden Eigenschaften eines Karstwassersystems im Hinblick auf Schutzmassnahmen zu erkennen. Ein Schwergewicht der Arbeit musste auf der synoptischen Auswertung der Resultate einzelner Untersuchungsparameter liegen. In den Tracerdurchgangskurven, den Abflussmengen und in der Wasserbeschaffenheit sind Informationen bezüglich räumlicher Lage des Einzugsgebietes, der Speichereigenschaften des Aquifers und allenfalls der Nutzung im Einzugsgebiet enthalten. Sie liefern Informationen, die sich gegenseitig ergänzen und auf Grund einer gewissen Redundanz eine Ueberprüfung erlauben.

Aus der Zusammenarbeit mit der Praxis ergab sich auch die Notwendigkeit einer Ueberprüfung der Effizienz der Methoden im Hinblick auf die Anwendung. Durch die Realisierung des anwendungsorientierten Fallbeispiels "Alpstein" mit einem methodisch orientierten Forschungsansatz, konnte eine fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis erreicht werden.

3. UNTERSUCHUNGSGEBIET

3.1. Lage, Topographie (Abb. 3.1)

Der Gebirgsstock des Alpsteins bildet zwischen Rheintal und Toggenburg die eindruckliche Alpenfront. Das Massiv wird im Nordwesten durch die Ueberschiebung der Säntis-Teildecke auf die subalpine Molasse begrenzt, im Osten fällt es steil ins Rheintal ab. Die südliche Begrenzung bildet die weite Mulde des Obertoggenburgs. Diese Abgrenzung fällt im Gegensatz zu den beiden andern nicht mit einer deutlichen geologisch-morphologischen Grenze zusammen, die Säntis-Teildecke findet ihre Fortsetzung südlich des Toggenburgs in der Churfürsten-Alvier-Gruppe.

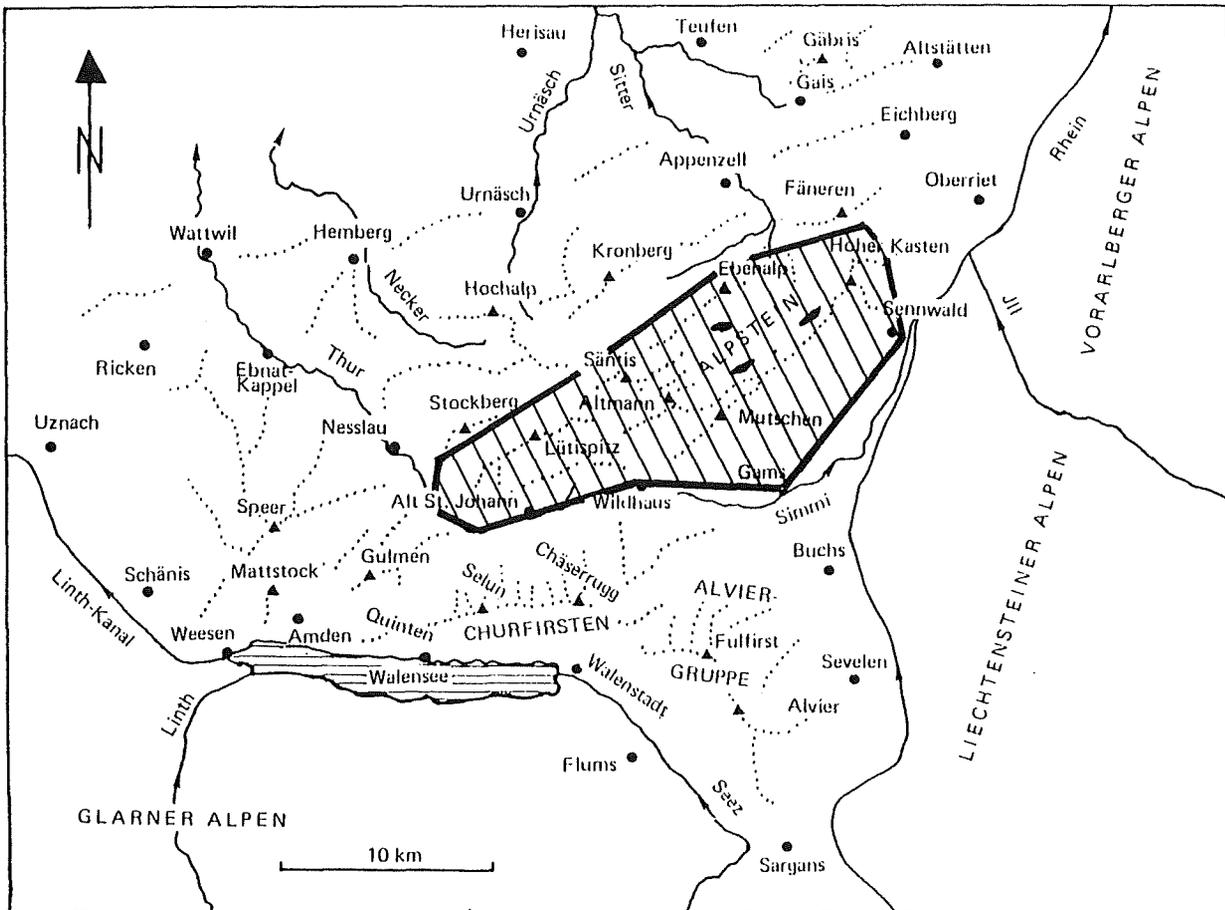


Abb. 3.1: Lage des Untersuchungsgebietes
(aus HEIERLI 1984:3)

Die Fläche der Säntis-Teildecke des Alpsteins beträgt rund 130 km², auf Grund der Topographie ist eine völlig trennscharfe Abgrenzung des eigentlichen Untersuchungsgebietes nicht möglich. Die durchgeführten Untersuchungen erfassen auch nicht flächendeckend das ganze Ge-

biet, sondern problemorientiert die wichtigsten Abflüsse und Einzugsgebiete, deren Abgrenzung ein Teil der Fragestellung bildet. Die von den Untersuchungen erfasste Gesamtfläche beträgt rund 80 km². Der höchste Gipfel des Alpsteins ist der Säntis mit 2503 m ü.M, im Rheintal liegt der tiefste Punkt auf rund 440 m ü.M.

Das Untersuchungsgebiet bildet keine hydrologisch geschlossene Einheit, die Entwässerung findet nach allen Seiten statt. Im Toggenburg liegt das Quellgebiet der Thur, nach Norden entwässert die Sitter einen Teil des Gebietes. Daneben entwässern zahlreiche Bäche den Nordwesthang und die Rheintalseite.

3.2. Geologie, Tektonik

"Der Alpstein ist ein jugendfrisches Gebirgsstück, gekennzeichnet durch eine herrliche Harmonie zwischen innerem Bau und äusserer Gestalt, eine "Aufrichtigkeit und Offenheit", wie sie kaum bei einem anderen Gebirge zu finden ist" (HEIM 1921:370).

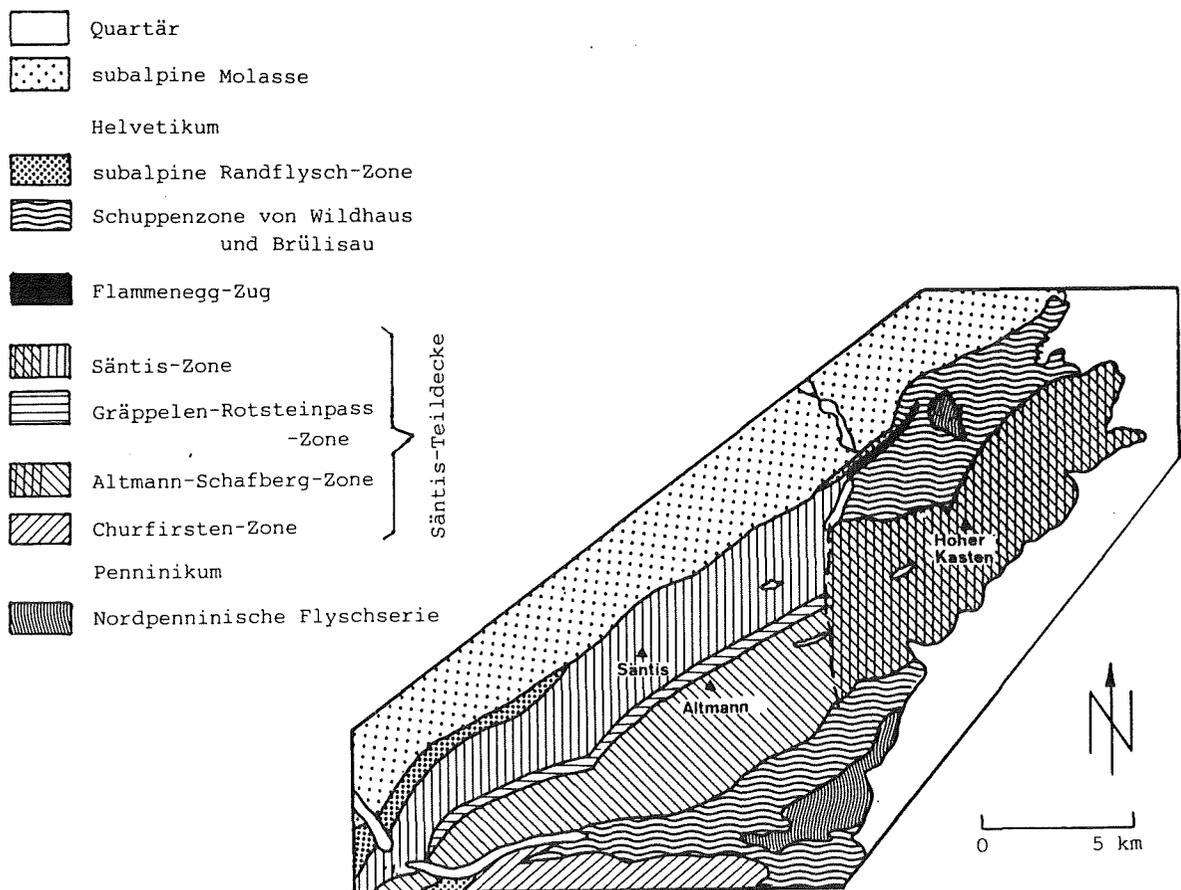


Abb. 3.2: Geologisch-tektonische Uebersicht

(nach HEIERLI,1984; KEMPF,1969; Geol.Atlas,1982)

Diese klar erkennbaren geologischen Strukturen machten den Alpstein zu einem beliebten Studienobjekt der Geologen. In ihren Grundzügen ist die Geologie und Tektonik bereits 1905 von Albert Heim aufgearbeitet und in einem reich illustrierten Werk dargestellt worden. Dieses diente Heim und seinem Mitarbeiter C. Meili als Grundlage zur Gestaltung des Säntis-Reliefs, das deutlich die Handschrift eines geologisch sachkundigen Gestalters trägt.

Der Alpstein ist geologisch ein Teil der helvetischen Säntis-Decke, die unter der Flyschmulde des Obertoggenburgs durchzieht und auch die Churfürsten und die Alviergruppe umfasst. Der Gebirgsbau ist geprägt durch ein Bündel südwest-nordost streichender Falten und Schuppen, die auch die topographische Gestalt bestimmen. Wir finden im Alpstein alle Faltenformen von der Antiklinale bis zu Ueberschiebungen ohne Verkehrtchenkel. Dabei ist allgemein ein Ueberkippen und Ueberfahren gegen Norden, eine Nordvergenz als Folge des Aufgleitens auf die südlichsten, nordsteigenden Platten der subalpinen Molasse festzustellen (HEIERLI 1984:66). Die Gliederung und Bezeichnung der einzelnen Antiklinalen und Synklinalen geht im Wesentlichen bereits auf die Untersuchungen von HEIM (1905) zurück.

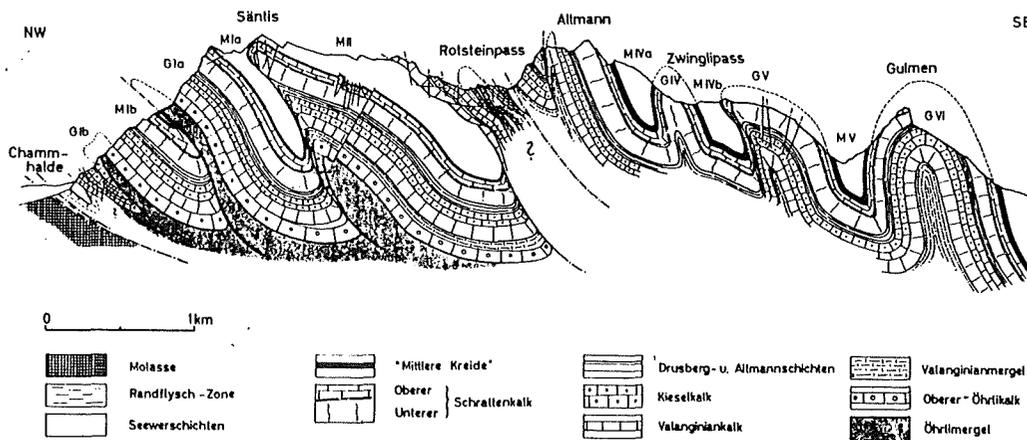


Abb. 3.3: Geologisches Querprofil (aus HEIERLI 1984:72)

Auch jüngere geologische Arbeiten setzten sich vor allem mit tektonischen und stratigraphischen Fragestellungen auseinander. Hydrogeologische Aspekte sind nicht explizit untersucht worden, obwohl bereits HEIM (1905:284) auf interessante, hydrologische Untersuchungen hinweist:

"Es wäre eine recht schöne und lohnende Aufgabe für jemand, der in der Nähe des Gebietes wohnt, die Quellerscheinungen des Säntisgebirges durch regelmässige Temperatur- und Ertragsmessungen und durch noch weitere Färbversuche und Härtebestimmungen allseitig zu prüfen. Solche jahrelange Beobachtungen würden sicherlich sehr interessante Resultate ergeben".

Von Südosten nach Nordwesten können grob drei Zonen mit verschiedenen tektonischen Charakteristika unterschieden werden (nach HEIERLI 1984:67ff):

Die Altmann-Schafberg-Zone

mit steil stehenden, einfachen Falten. Teilweise ist das Gewölbe wegerodiert und der steil stehende, harte Schrattenkalk bildet imposante Wände (z.B. Kreuzberge). Die einzelnen Falten und ihr Verlauf sind im Gelände sehr gut zu verfolgen.

Die Rotsteinpass-Gräppelen-Zone,

die morphologisch als ausgeprägte Längsfurche Neuenalp-Gräppelen-Thurwies-Rotsteinpass-Bötzel-Widderalp in Erscheinung tritt. Hier erfolgt ein sukzessiver Fazieswechsel von den kalkreichen, kompetenten Schichten der Säntis-Zone zu den mergeligen Serien der Altmann-Schafberg-Zone. Im komplizierten Bau dieser Zone ist es unmöglich einzelne Antiklinalen sauber zu unterscheiden, da auch relativ wenig Aufschlüsse vorliegen.

Die Säntis-Zone

mit engen isoklinalen Falten und Schuppen und meist abgeschertem Mittelschenkel, die auf die subalpine Randflyschzone, respektive auf die subalpine Molasse aufgefahnen sind. Die daraus resultierende Wiederholung der Schichtabfolge ist am Nordwesthang von der Schwägalp aus sehr schön zu beobachten.

Oestlich des Sax-Schwendi-Bruches verschmelzen die Säntis-Zone und die Altmann-Schafberg-Zone zur einheitlichen, in sich verfalteten Säntis-Kreidedecke.

Meist direkt auf der subalpinen Molasse liegt die aus dem südhelvetischen Raum dislozierte und überfahrene Randflyschzone. Zur Säntis-Teildecke gehören auch die tektonisch höheren, von der Erosion verschont gebliebenen Flyschzonen von Wildhaus und Brülisau, denen noch penninische Klippen (z.B. Fänerenspitz) aufsitzen.

Im Alpstein gibt es eine grosse Zahl von Querbrüchen, die die Falten horizontal oder vertikal, meist beides zugleich, versetzen, ohne dass auf beiden Bruchseiten

die Gestalt der Falten wesentlich ändert. Die Querbrüche sind also jünger als deren Längsbrüche, die samt den Falten quer verschoben sind (HEIM, 1921:367). Der Sax-Schwendi-Bruch ist der eindrücklichste von allen und durchquert das ganze Alpsteinmassiv. Er ist selbst auf der topographischen Karte klar erkennbar, wie er messerscharf von der Saxerlücke zum Stifel (Aufstau des Fälensees) und zur Bogartenlücke durchzieht. Diese beiden tektonischen Elemente:

- Querbrüche
- Streichrichtung der Falten

spielen auch für die Hydrologie des Alpsteins eine hervorragende Rolle.

Für die stratigraphische Gliederung verwenden wir die Bezeichnungen von KEMPF (1966), der die Stratigraphie detailliert untersucht und beschrieben hat. Die Schichtreihe des Alpsteins umfasst nur die Kreide und das Tertiär. Im nördlichen Alpstein bilden die Oehrli-mergel den basalen Abscherungshorizont der Säntis-Kreide, im südlichen und östlichen Teil fehlen diese Schichten aus dem Berriasian. Hier bilden die Valanginianmergel das basale Gleitniveau, ihre Mächtigkeit schwankt stark und erreicht im Maximum 120 m (HEIERLI 1984:21). Die Oehrli-mergel und -kalke spielen eine wichtige Rolle im Nordwesthang des Alpsteins. An der Typlokalität des Oehrli lassen sich vier Schichtglieder ausscheiden, die sich auch hydrologisch unterschiedlich verhalten. Die Valanginianmergel fehlen im nördlichen Alpstein primärstratigraphisch oder tektonisch (HEIERLI 1984:21), nehmen aber gegen Süden und Westen rasch an Mächtigkeit zu. Sie bilden lokal einen bedeutenden Stauer, der zur oberflächlichen Entwässerung (Gebiet Widderalp) oder zu kleinen Quellaustritten führt. Die Kalke des Valanginian lassen sich deutlich dreiteilen, wobei der obere Valanginiankalk die grösste Mächtigkeit aufweist. Der Kieselkalk stellt im Alpstein ein sehr auffallendes Schichtglied dar, bedingt durch seine dunkle Anwitterungsfarbe sowie die häufige Bedeckung mit Vegetation (KEMPF 1966:10).

Die lithologisch variablen Altmann-Schichten sind das tiefste Schichtglied der Drusberg-Mergelformation (HEIERLI 1984:27). Die Drusberg-Schichten mit ihren vorwiegend mergeligen Sedimenten bilden den zweiten wichtigen Stauer im Alpstein. Es ist allerdings zu beachten, dass sie oft tektonisch ausgequetscht sind, und daher in der

Schichtreihe dieser StauhORIZONT lokal fehlen kann. Der Schrattenkalk bildet die grössten und eindrucklichsten Wände im Alpstein. Hydrologisch sind die sehr gut verkarstungsfähigen Kalke von grosser Bedeutung, insbesondere der massige, untere Schrattenkalk. Der mittlere Schrattenkalk weist Mergelzwischenlagen auf, und der obere Schrattenkalk ist im gesamten dünnbankiger.

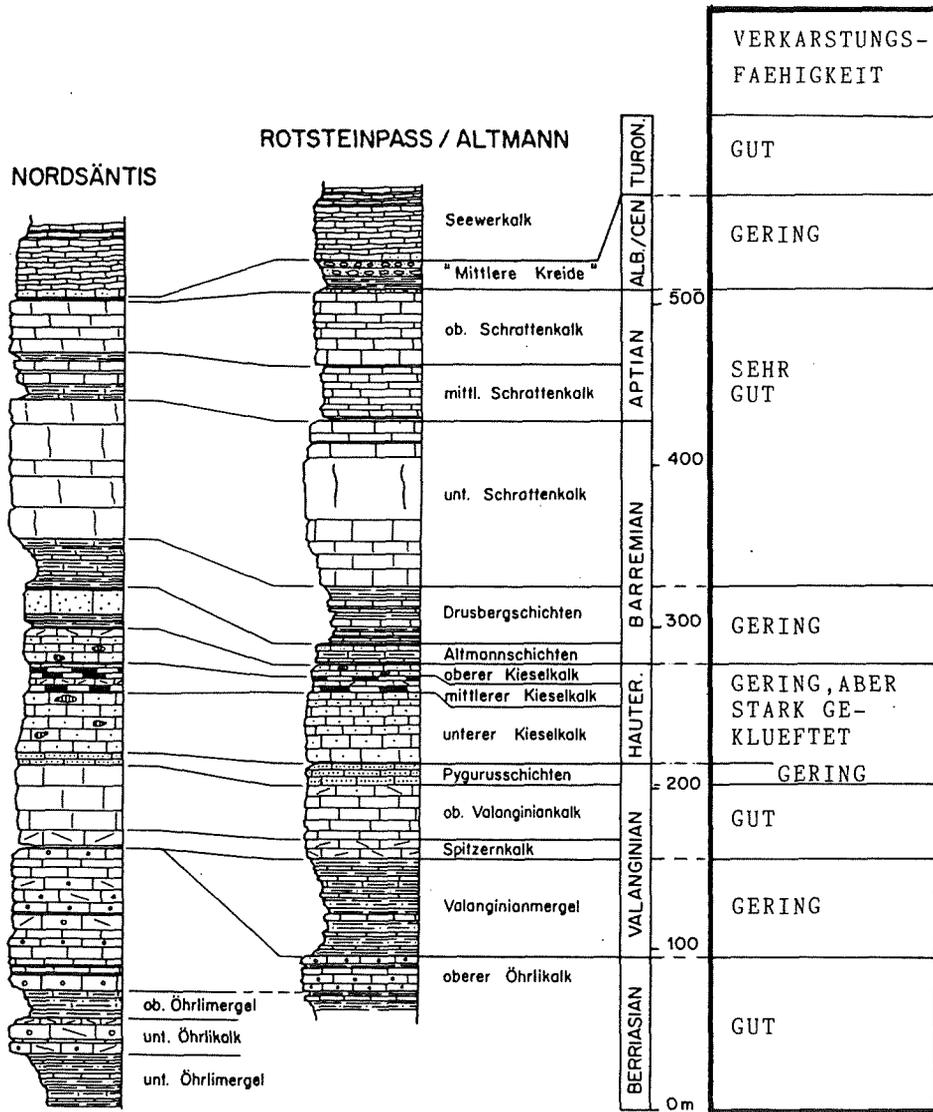


Abb. 3.4: Schichtreihe und Verkarstungsfähigkeit (Stratigraphie aus KEMPF 1966)

Die glaukonitreiche, mittlere Kreide (Gault) ist nur geringmächtig, kann aber in eine ganze Zahl von Schichtgliedern aufgeteilt werden. Das jüngste bedeutende Schichtglied des Alpsteins sind die dünn geschichteten, mit schwarzen Tonhäuten durchsetzten Seewerkalke. Die höheren kretazischen Schichtglieder sind im Alpstein nur lokal vorhanden (Seewerschiefer, Amdener Schichten)

oder fehlen (Wang-Formation). Ebenso fehlt das Tertiär im Inneren des Säntismassivs (HEIERLI 1984:37).

Auf Abbildung 3.4 ist die Verkarstungsfähigkeit der einzelnen stratigraphischen Einheiten grob beurteilt. Die Beurteilung erfolgte auf Grund phänomenologischer Kriterien, den Grundlagen zur Verkarstung wie sie im Kapitel "Konzept und Theoretische Grundlagen" dargestellt sind und auf Grund gesteinschemischer Analysen von LIENERT (1965:37) und FUNK (1971:385). In dieser groben Form dürfte die Beurteilung für das ganze Alpsteinmassiv zutreffen, obwohl die Verkarstungsfähigkeit räumlich entsprechend der variierenden lithologischen Ausbildung leicht unterschiedlich sein kann. Die Verkarstungsfähigkeit hängt eng mit der hydrologischen Gebirgsdurchlässigkeit zusammen. Dabei spielen aber auch tektonische Aspekte (Brüche, Lage in der Schichtreihe) eine Rolle.

Die subalpine Randflysch-Zone und die Schuppenzonen von Wildhaus und Brülisau bestehen aus Amdener-Schichten (kalkarme bis kalkfreie, sandige Mergel) und der Wang-Formation aus der obersten Kreide sowie aus tertiären Sandkalken, Mergeln und Wildflysch. Diese Zonen verhalten sich hydrologisch ganz anders als die Säntis-Decke: Die Gesteine sind kaum verkarstungsfähig und wirken als Stauer, wie die subalpine Molasse. Dies führt in den Uebergangsbereichen zu zahlreichen Quellen, wo Karstwasser austritt und das oberflächliche Gewässernetz speist.

3.3. Klima

Für hydrologische Fragestellungen ist von den klimatischen Elementen in erster Linie der Niederschlag als Systeminput von direktem Interesse. Niederschlagsmenge, -form (Schnee, Regen) und -verteilung werden aber von den Wind- und Temperaturverhältnissen beeinflusst.

Die Windrose des Säntisgipfels wird wegen der freien Gipfelage stark vom Windfeld in der freien Atmosphäre geprägt. Es dominieren bezüglich Häufigkeit und Stärke Winde aus westlicher Richtung. Diese führen am steilen Nordwesthang zu einer ausgeprägten Stausituation und entsprechend hohen Niederschlagswerten in diesem Gebiet. Im Rheintal und im Gebiet Hoher Kasten-Brülisau ist zeitweise ein kräftiger Föhn einfluss zu verzeich-

nen, der auch einen Einfluss auf die Temperaturverhältnisse ausübt.

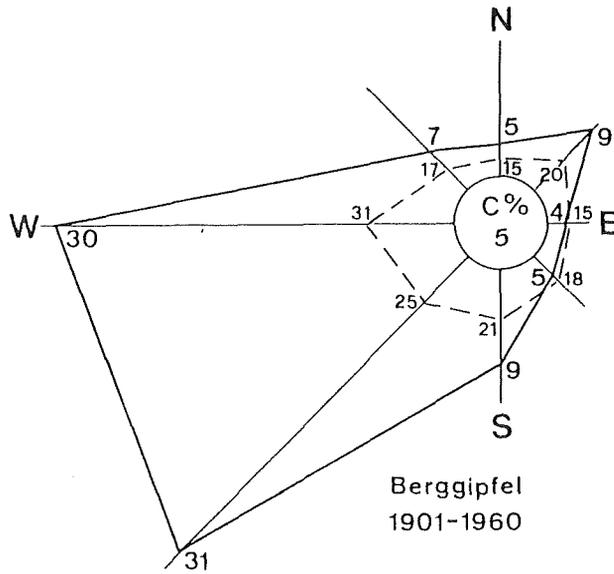


Abb. 3.5: Windrose des Säntis (aus SMA 1979)

Abbildung 3.6 zeigt die Höhenabnahme der Temperatur, die entsprechende Unterschiede in der Dauer der Schneedecke bewirkt. Im Mittel der Periode 1959-79 liegt auf dem Säntis während 343 Tagen Schnee (SMA 1980:10). Auf Grund der linearen Abnahme mit der Höhe dürfte der entsprechende Wert für Appenzell (785 m.ü.M) bei rund 80 Tagen liegen (nach SMA 1980:5).

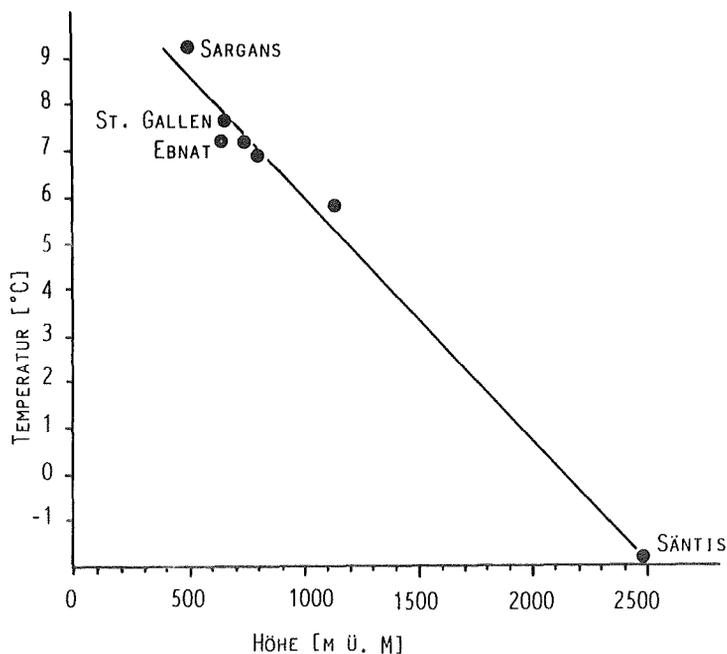


Abb. 3.6: Höhenabhängigkeit der Temperatur

Die Erfassung des Schneedeckenspeichers ist sehr komplex, da für die Schneeschmelzprozesse verschiedene Grössen eine Rolle spielen. Immerhin ist im Alpsteingebiet die Bedeutung der jahresübergreifenden Speicherung in Schnee und Eis gering und vernachlässigbar.

3.4. Tourismus, Alpwirtschaft

Ausser den Südhängen im Toggenburg ist das Untersuchungsgebiet im Bereich der helvetischen Kreidedecke nicht ganzjährig besiedelt. Sie setzt erst in den anschliessenden Gebieten mit quartären Talböden (z.B. Wasserauen), Flyschzonen oder subalpiner Molasse ein. Das eigentliche Untersuchungsgebiet wird nur touristisch und alpwirtschaftlich genutzt. Eine Sonderstellung nimmt der Säntisgipfel mit seinen zahlreichen, technischen Einrichtungen ein.

Der grösste Teil des Alpgebietes liegt im Kanton Appenzell Innerrhoden. Hier sind rund die Hälfte der Alpflächen in Privatbesitz (ALPKATASTER 1968:45). Die meisten Alpen werden als gemischte Betriebe geführt, reine Kuh-, Galtvieh- oder Schafalpen sind eher selten (ALPKATASTER 1968:57). Oft werden zur Verwertung alpwirtschaftlicher Nebenprodukte auch noch einige Schweine gehalten. Die Weidezeit beträgt im Mittel 81 Tage. Die Erschliessung mit Strassen ist wegen der Topographie recht schwierig und noch weniger weit fortgeschritten als in anderen Gebieten, was zur Erhaltung der ursprünglichen Eigenarten und Bewirtschaftungsformen beiträgt.

Ausser dem Säntisgipfel und dem Betrieb zweier Skilifte auf der Ebenalp beschränkt sich der Tourismus auf das Wandern, Klettern und Beherbergen im Sommer. Der Alpstein ist ein ausserordentlich beliebtes und schönes Wandergebiet. Die zahlreichen Bergwirtschaften gestalten dies auch ausgesprochen angenehm, rund jede Wegstunde erreicht man eine Gaststätte. Insbesondere die drei Seen sind beliebte und leicht erreichbare Ausflugsziele. Tabelle 3.1 zeigt die ungefähren Uebernachtungszahlen einiger Gasthäuser. Diese erlauben es aber nicht einen Ueberblick der effektiven Belastung zu erhalten. Die Zahl der Tagesausflügler ist um ein

Vielfaches höher und fällt insgesamt viel bedeutender ins Gewicht.

Tab. 3.1: Uebernachtungszahlen einiger Gasthäuser

Ort	Anzahl Uebernachtungen
Seealpsee	2 000
Meglisalp	2 500
Mesmer	700
Bollenwees	4 000

4. KONZEPT UND THEORETISCHE GRUNDLAGEN

4.1. Einleitung

Die Erarbeitung und Ueberprüfung einer Untersuchungsmethodik, die den Anforderungen aus der Sicht der Praxis genügt, ist das wissenschaftliche Ziel dieser Arbeit. Da im Untersuchungsgebiet nur auf wenige vorhandene hydrologische Daten zurückgegriffen werden konnte, bildete die Planung und Durchführung der Felderhebungen einen wesentlichen Teil der Untersuchungen. Art und Umfang der Erhebungen mussten sich v.a. an folgenden Vorgaben orientieren:

- Erfüllung der Zielsetzungen gemäss Kapitel 2, d.h. Erarbeitung der Grundlagen für den Gewässerschutz.
- Effizienter Einsatz beschränkter Mittel, wie es für praxisorientierte Untersuchungen die Regel ist.
- Schwierige Topographie und Grösse des Untersuchungsgebietes. Es handelt sich um einen relativ grossen Gebirgsstock mit Abfluss nach allen Seiten.

Der gewählte Lösungsansatz wird im folgenden umrissen. Als Grundlage wird zuvor kurz Struktur und Funktionsweise von Karstwassersystemen skizziert. Die Kenntnis dieser Mechanismen ist auch für die Beurteilung der Resultate und von Grundwasserschutzmassnahmen von entscheidender Bedeutung.

4.2. Das Karstwassersystem

4.2.1 Modellvorstellung der Karstwasserzirkulation

Im Laufe der Zeit haben sich die hydrologischen Modellvorstellungen von Karstgebieten entwickelt und verändert. Dabei standen sich zwei Anschauungen schroff gegenüber (LOUIS 1968:234):

- die Höhlenflusstheorie
- die Grundwassertheorie

Die Höhlenflusstheorie nimmt die Existenz voneinander unabhängiger Höhlenflüsse an. Die Grundwassertheorie geht davon aus, dass in einem Karstwassersystem ein durchgehender Karstwasserspiegel vorhanden ist, ähnlich wie im Po-

rengrundwasser. Mit keiner der beiden Auffassungen können alle karsthydrologischen Phänomene erklärt werden. Tatsächlich sind in einem Karstwassersystem Elemente beider Vorstellungen enthalten. BOEGLI(1978:114) nennt für das Karstgrundwasser folgende einengenden Bedingungen gegenüber der Definition des Porengrundwassers:

1. Die zusammenhängende Grundwasserfläche fehlt. An ihrer Stelle gibt es in grösseren Abstände Einzelflächen, die sich nicht in eine geometrisch fassbare Fläche einfügen lassen.
2. Der Karstwasserkörper bewegt sich nicht als Ganzes vorwärts, sondern uneinheitlich in einzelnen Strängen (Röhrenfliessen). Trotz räumlicher Verbundenheit sind sie häufig hydrographisch voneinander unabhängig.
3. Als Folge des Röhrenfliessens bilden sich nicht einheitliche Potentialflächen, sondern individuelle, die keine gemeinsame Form bilden.
4. Der Durchmesser der karsthydrographisch wirksamen Hohlräume reicht von wenigen Millimetern bis zu Dekameter- und Hektometern. Daher ist auch die Fliessgeschwindigkeit im Karstgrundwasser bei gleichem Druckgefälle um Zehnerpotenzen höher als im Poren- und Kluftgrundwasser.
5. Aehnliche Grössenunterschiede herrschen auch in den Hohlraumnetzen.

Die Hydrologie eines Karstgebietes wird charakterisiert durch die Heterogenität und Anisotropie der Durchlässigkeiten und das Ueberwiegen der unterirdischen Entwässerung. Es besteht ein Netz von Kanälen, im Extremfall zugänglichen Höhlen, mit sehr grossen Durchlässigkeiten. Dieses Netz führt zu einer raschen Entwässerung über grosse Distanzen und zu grossen Schüttungsschwankungen bei den Quellen. Dazwischen liegen aber Blöcke mit kleineren Klüften und geringen Durchlässigkeiten, die eine ausglei-

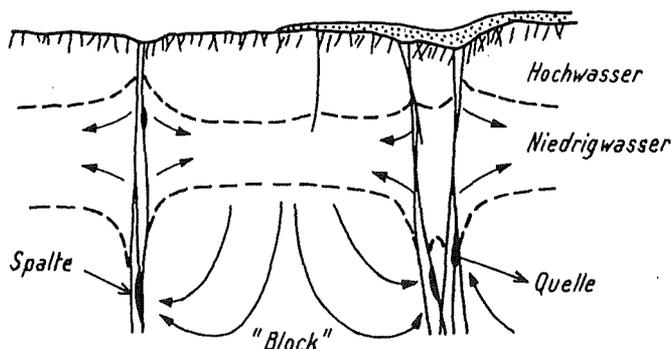


Abb. 4.1: Karstwasserfliessen in Spalten und "Blöcken"
(aus MUELLER et al. 1980:21)

chende Speicherfunktion ausüben. Bei Hochwasser wird Wasser in die kleinen Klüfte und Schlotte ausgepresst, das bei sinkendem Wasserspiegel langsam wieder in die grossen Karstgerinne zurückfliesst und den Basisabfluss der Quellen speist. Abbildung 4.1 zeigt die Fliessverhältnisse in den beiden Teilsystemen.

Bei der Durchlässigkeit muss zwischen Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit unterschieden werden. KIRALY (1973:7) erwähnt für den Neuenburger Jura k -Werte von 10^{-3} m/s und Gesteinsdurchlässigkeiten von 10^{-6} bis 10^{-7} m/s. Er stellte rechnerisch eine Beziehung zwischen Gebirgsdurchlässigkeit und Kluft- bzw. Kanaldurchmesser und -abstand auf. Ihre direkte Anwendung scheitert aber an der Unkenntnis eben dieser Parameter. Eine Gebirgsdurchlässigkeit kann durch Anpassung an ein gemessenes Hydrogramm erfolgen (TRIPET 1973:96). Er schlägt auch die Ermittlung von Durchlässigkeiten auf Grund von Markierversuchen vor. Dies ergibt Werte für eine untersuchte hydrologische Verbindung, die nicht ohne weiteres übertragbar sind. Die Werte liegen zudem oft ausserhalb des Gültigkeitsbereichs des Darcy-Gesetzes.

Die karsthydrographischen Zonen, wie sie in Abbildung 4.2 dargestellt sind, bilden eine schematische vertikale Gliederung des Karstwassersystems. Ueber der wassererfüllten phreatischen Zone befindet sich die vadoso Zone, die vom Sickerwasser durchflossen wird. In der vadosen Zone herrscht eine mehr oder weniger vertikale Infiltration hin zur Karstwasserfläche. In der phreatischen Zone gewinnt dann die horizontale Strömungskomponente an Bedeutung. Die Mächtigkeit von phreatischer und vadoser Zone wechselt sehr stark mit den hydrologischen Bedingungen. Die Unterteilung in eine seicht und eine tiefphreatische Zone ist nicht trennscharf. BOEGLI (1978:111) unterscheidet den seichtphreatischen Teil mit stärkerer Wasserbewegung vom tiefphreatischen mit geringer Bewegung. Die Mächtigkeiten sind dementsprechend sehr variabel. Bildet die Austrittsstelle (Quelle) die tiefste Stelle des Karstwassersystems spricht man auch von seichtem Karst.

Für die Interpretation der Quelldaten ist von Bedeutung, dass der Zufluss ins Karstwassersystem nur beim nackten Karst direkt aus dem Niederschlag stammt. Meist fliesst der Input aus dem Bodenwassersystem, der Schneedecke oder aus einem Oberflächenspeicher (z.B. See) zu. Dies ermöglicht Interpretationen bezüglich Dauer der Schneeschmelze,

Höhenlage des Einzugsgebietes. Dieser schwer zu erfassende Input erschwert andererseits die Analyse des Auslaufverhaltens des Karstwasserspeichers.

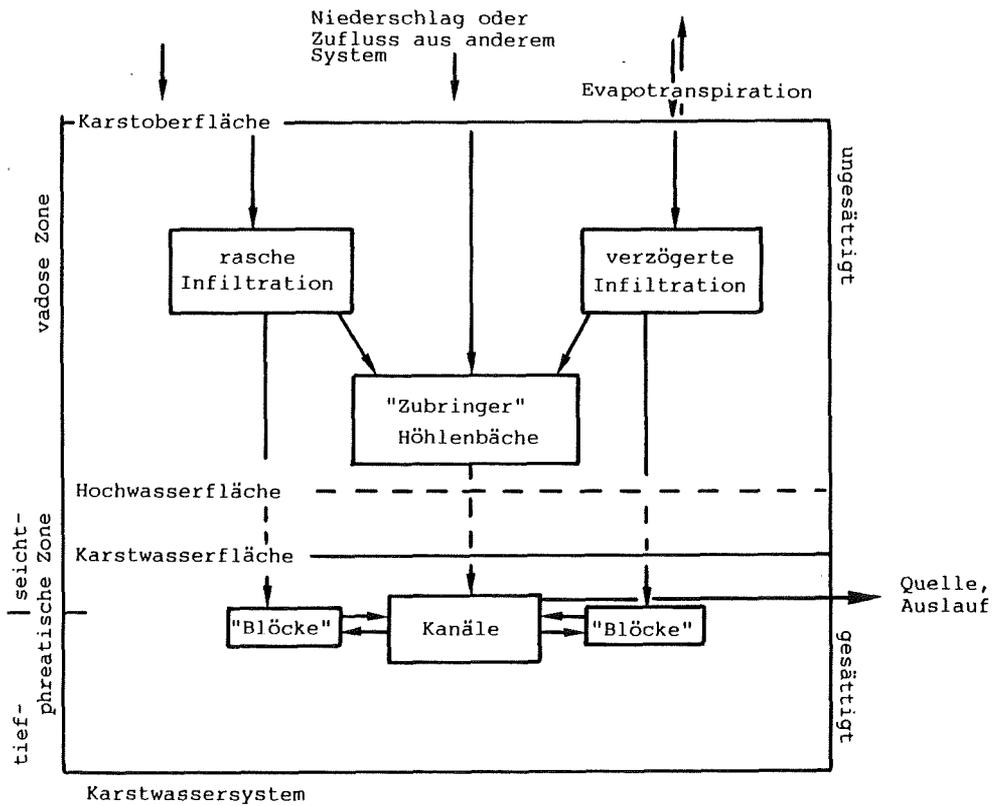


Abb. 4.2: Schematische Darstellung eines Karstwassersystems

Dieser komplexe Systemaufbau verhinderte bisher eine operationell einsetzbare, mathematische Modellierung auf physikalischer Grundlage, die beim Porengrundwasser mittels relativ weniger Parameter möglich ist. Im Gegensatz zum Porengrundwasser ist für ein Karstwassersystem keine zweidimensionale Vereinfachung des Aquifers möglich. Die Kenntnisse über Struktur und Parameter des Aquifers reichen bis heute für eine numerische Simulation nicht aus, wie sie sich im Porengrundwasser bewährt hat. SMART (1983) führte die Modellierung eines Karstsystems auf Grund der vereinfachenden Annahme von Röhren durch und erzielte damit einigermaßen befriedigende Resultate. Die Annahme von ein bis vier geraden Röhren ohne wechselnden Querschnitt und die Vernachlässigung der kleineren Klüfte ist aber eine so einschneidende Vereinfachung, dass die verwendeten Modellparameter nicht als eigentliche Aquiferparameter bezeichnet werden können. Zudem berücksichtigt dieses Modell

auch keine vadose Zone. Erfolgversprechende Ansätze dürften allenfalls Black-Box-Modelle (z.B. Unit Hydrograph) oder Konzeptmodelle (z.B. Speicherkaskade) sein. PETRASCHKEK und TRIPET (1982:79ff) verwendeten für die Abschätzung der Grundwassererneuerung im Laufental den Ansatz einer Speicherkaskade mit vier Speichern, die den unterschiedlichen Karstwasserspeichern entsprechen dürften.

Im kleinen Massstab erscheint die Anlage eines Karstwassersystems als zufällig. Betrachtet man das System als Ganzes ist es hierarchisch strukturiert (BAKALOWICZ, MANGIN 1980:72), ähnlich wie ein oberflächliches Gewässernetz, aber dreidimensional. Die Bestimmung von Kenngrößen des Karstwassersystems ist mit geophysikalischen Methoden nur zum Teil direkt möglich und ist oft schwierig und teuer (BURGER 1983:546). Indirekte Methoden erhalten deshalb eine wichtige Bedeutung.

Bei Untersuchungen in einem Karstgebiet erhält oft die Abgrenzung der Einzugsgebiete, die in andern Gebieten meist einfach auf Grund der topographischen Karte möglich ist, eine zentrale Bedeutung. Die Entwässerungsrichtung wird einerseits durch das Vorflutniveau im angrenzenden, nicht verkarsteten Gebiet, andererseits durch die Wasserwegsamkeit des inhomogenen und anisotropen Karstgebietes bestimmt. Oft ist aber eine eindeutige Abgrenzung gar nicht möglich, da Ueberschneidungen der Einzugsgebiete vorkommen, v.a. in jungen noch nicht voll entwickelten Karstgebieten (BOEGLI 1978:81). Der Begriff fester Grenzen muss aber endgültig aufgegeben werden. Die Karstwassersysteme sind durch wechselnde Grenzen in Funktion der hydrologischen Bedingungen charakterisiert (BURGER 1983:547).

4.2.2 Der Stofftransport in Karstwassersystemen

Auf Grund der Modellvorstellungen der Karstwasserzirkulation ist es möglich die Stofftransportvorgänge in Karstwassersystemen, die sowohl für Markierversuche wie für die Ausbreitung von Schadstoffen gültig sind, zu gliedern. In Abbildung 4.3 sind die Prozesse der Stoffausbreitung aufgeführt. Es sind im wesentlichen die gleichen wie in porösen Medien (vgl. SANSONI, SCHUDEL, WAGNER 1987:78). Allerdings liegt die Gewichtung der einzelnen Prozesse in Karstwasserverhältnissen anders, zudem müssen andere Aquiferparameter eingeführt werden. Grundsätzlich ist dieses Wirkungsgefüge auch auf den ungesättigten Bereich eines

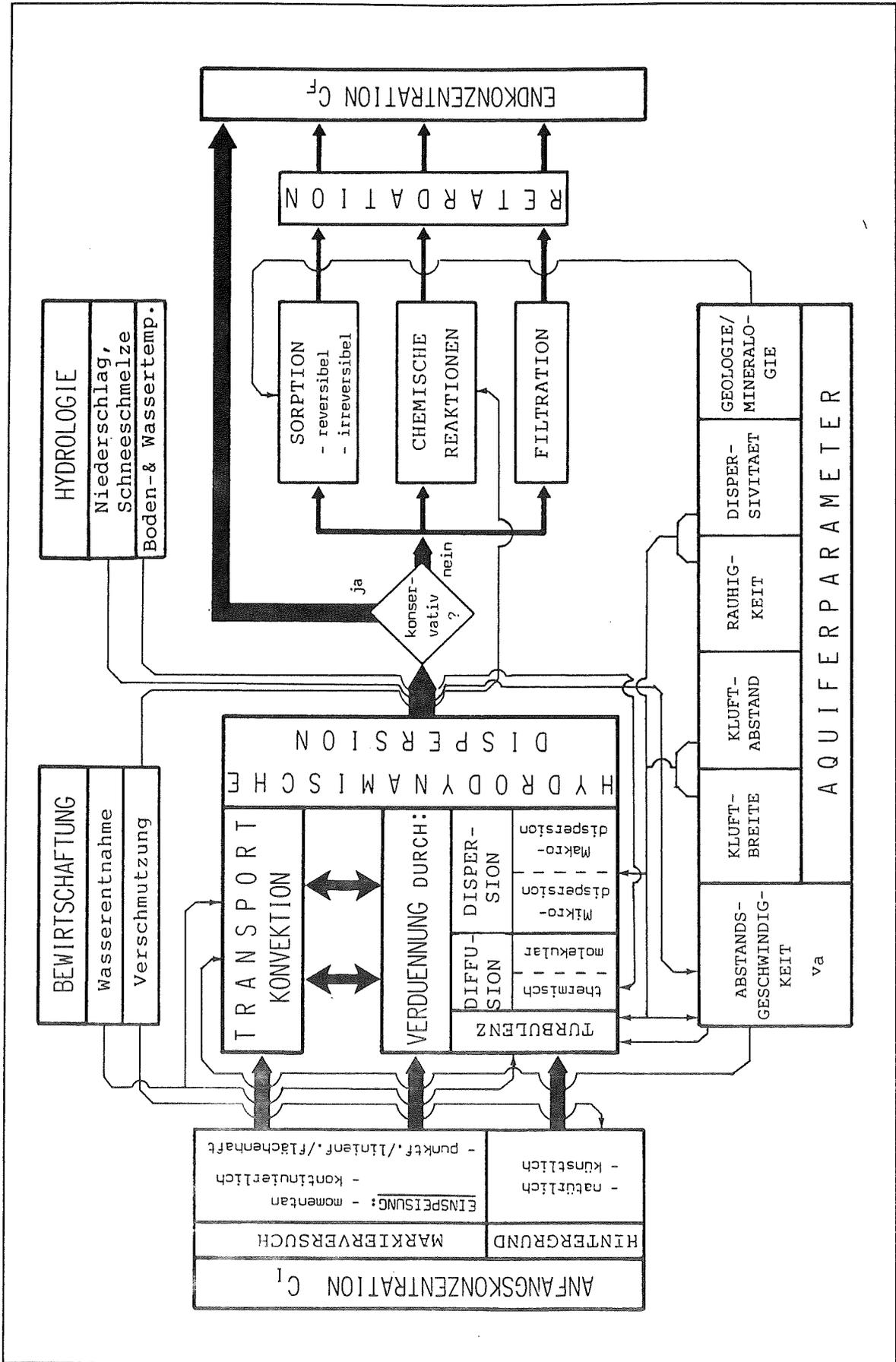


Abb. 4.3: Stofftransport in Karstwassersystemen (nach SANSONI, SCHUDEL, WAGNER 1987:78)

Karstwassersystems anwendbar, da Kapillarkräfte eine sehr untergeordnete Rolle spielen.

Die Erfassung der Transportvorgänge wird in Karstwassersystemen durch die raum-zeitliche Variabilität der Fließgeschwindigkeit und der Aquiferparameter ausserordentlich erschwert. Im folgenden sind die wichtigsten Grössen aus Abbildung 4.3 kommentiert.

Fliessgeschwindigkeit

Zeitlich ist die Fließgeschwindigkeit so variabel, dass kaum je von stationären Fließbedingungen gesprochen werden kann. Die räumliche Verteilung der Fließgeschwindigkeit ist von den Aquiferparametern bestimmt.

Aquiferparameter

Die Aquiferparameter variieren in allen drei Raumdimensionen sehr stark und machen zweidimensionale Vereinfachungen unstatthaft. Homogenität kann höchstens in einem sehr beschränkten mittleren Massstabsbereich angenommen werden. Kleinräumig besteht eine gewisse Zufälligkeit der Anordnung wasserwegsamere Klüfte, in der Dimension des Einzugsgebietes widerspricht der hierarchische Aufbau einer homogenen Struktur. Mit wechselnden hydrologischen Verhältnissen ändern auch die Mächtigkeiten von gesättigter und ungesättigter Zone und damit auch die Aquifereigenschaften.

Konvektion

Unter der Konvektion versteht man den Stofftransport, der nur auf der Fließbewegung des Wassers beruht und nur durch den Geschwindigkeitsvektor der Wassermoleküle bestimmt wird. Vermischungsvorgänge werden nicht berücksichtigt.

Turbulenz

Bei den hohen Fließgeschwindigkeiten in Karstwassersystemen spielt die Turbulenz eine hervorragende Rolle. Ihr Einfluss auf die Verdünnung ist schwer fassbar und entzieht sich einer analytischen Lösung. Die mathematische Beschreibung der Turbulenz ist ein Problem der mathematischen Statistik und der Theorie stochastischer Prozesse (DYCK 1980:419).

Diffusion

Die Diffusion umfasst den Vermischungsprozess aufgrund der Brown'schen Molekularbewegung und beruht auf Konzentrations- und Temperaturunterschieden. Auf Grund des Fließens in Kanälen und Spalten in Karstwassersystemen treten in

Kontaktbereichen grosse Konzentrationsunterschiede auf, so dass der Diffusion eine gewisse Rolle zukommt. In Kluftmodellen muss deshalb der Diffusionskoeffizient des betreffenden Stoffes (z.B. Tracer) berücksichtigt werden (MALOSZEWSKI 1985).

Dispersion

Die Dispersion beruht auf den unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten einzelner Stromfäden, die zur Vermischung führen. Sie wird durch die Fließgeschwindigkeit und die Struktur des Aquifers (Aquiferparameter) beeinflusst. Sie spielt auch in Karstwassersystemen eine wichtige Rolle. Bei Karstquellen kann aufgrund der Konvergenz des Wassers an einem Punkt nur eine longitudinale Dispersion erfasst werden.

In Karstverhältnissen wird für die verwendeten Markierstoffe im gesättigten Bereich im allgemeinen ein konservatives Verhalten angenommen. Sorptionsprozesse können für bestimmte Markierstoffe (z.B. Rhodamin) im ungesättigten Bereich von gewisser Bedeutung sein. Dieses Verhalten kann (oder muss) in Karstwassersystemen auch für viele andere Stoffe vereinfachend angenommen werden.

4.2.3 Entwicklung

Ein Karstwassersystem unterliegt einer steten Entwicklung, die in geologischen Zeiträumen abläuft. Am Anfang der Entwicklung besteht keine unterirdische Entwässerung, weil die vorhandenen Schichtfugen, Klüfte und etwaigen tektonischen Hohlräume im allgemeinen nicht geöffnet und insbesondere nicht fortlaufend miteinander verbunden, d.h. karsthydrographisch wegsam sind (LOUIS 1968:274). Die Entwicklung beruht auf der Löslichkeit von Kalk (vgl. Kap. 9.1.3). Die Kalklösung erweitert bestehende tektonische Klüfte oder Schichtfugen. Auf Grund der Mischungskorrosion (aus der Mischung zweier kalkgesättigter Wässer unterschiedlicher Härte entsteht kalkaggressives Wasser) ist die Korrosion an der Oberfläche der phreatischen Zone (seichtphreatische Zone) besonders intensiv (BOEGLI 1978:107).

Die allgemeine Ansicht über die Entwicklung von Karstwassersystemen geht dahin, dass sich eine Entwässerung auf das tiefste Vorflutniveau einstellt. BOEGLI (1978:115)

schreibt über die Entwicklung:

"Mit der Erweiterung der Fugen setzt die karsthydrographische Wirksamkeit ein, und die Obergrenze der wassergesättigten Zone senkt sich. Zuletzt gelangt diese unter den direkten Einfluss des Vorflutniveaus, oder es bildet sich ein seichter Karst mit dem Gerinne auf der undurchlässigen Sohlschicht."

Mit dem Entwicklungsalter nimmt die Zahl der Quellen ab (BOEGLI 1978:82). Die kleinen Fugen und Klüfte, die für den Wasserdurchsatz einen höheren Druck voraussetzen, gelangen mehr und mehr in das Einzugsgebiet ausgeweiteter Fliesswege.

Die Verkarstungsfähigkeit des Gesteins wird bestimmt durch die chemische Zusammensetzung und die Ausbildung der Schichtreihe, sowie durch die Verfügbarkeit von CO₂. BOEGLI (1978:7) beurteilt die Verkarstungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Verunreinigung wie folgt:

Tab. 4.1: Beurteilung der Verkarstungsfähigkeit nach chemischer Zusammensetzung

a) Kalk/Ton	Verunreinigung in %	Verkarstungsfähigkeit
Kalk, sehr rein	0– 5	Ausgezeichnet
Kalk	5– 10	Gut
Mergelkalke	10– 30	Karrenbildung erschwert, ab 15% nur noch angedeutet. Dolinen gut. Kleine Höhlen nur ausnahmsweise bis zu 20%. Bei über 20% keine Verkarstung
Mergel/Mergelschiefer	30– 70	Undurchlässig, keine Karstformen
Mergelton	70– 85	Undurchlässig, plastisch
Ton	85–100	Undurchlässig, plastisch
b) Kalk/SiO ₂	Verunreinigung in %	Verkarstungsfähigkeit
Kalk	0– 10	Ausgezeichnet bis gut
Kieseliger Kalk, Sandkalk	10– 30	Kaum oder nicht verkarstungsfähig
Kieselkalk	30– 50	Keine Verkarstung
Quarzsandstein mit Kalkmatrix	50– 90	Keine Verkarstung (Matrix = Grundmasse, Bindemittel)
Quarzsandstein, Quarzit	90–100	Keine Verkarstung

Folgende Merkmale einer Schichtreihe wirken für die Verkarstung begünstigend (HEMPEL 1974:67):

- grosse Schichtmächtigkeit
- massige und grobbankige Gesteinsserien

Das CO₂ hat verschiedene Quellen, die je nach klimatischen und biologischen Bedingungen unterschiedliche Bedeutung haben (Tab. 4.2).

Tab. 4.2: Herkunft des Kohlendioxids
(aus HEMPEL 1974:71)

	1	2	3	4	5	6
Hochgebirge und periglaziale Zone	45	5	30	5	15	1
gemässigte, fluviale Zone	7	10	55	4	24	6
mediterrane Zone	3	8	56	8	25	9
Wüstenzone	30	15	-	55	-	12
Tropenzone	1	2	50	3	44	72

- 1: Atmosphärisches Kohlendioxid (Alle Angaben in %)
 2: aus anorganischen Bodenprozessen stammendes Kohlendioxid
 3: biogenes Kohlendioxid
 4: andere anorganische Säuren
 5: organische Säuren
 6: relative Grössenordnung der Karstkorrosion der betreffenden Klimazone

4.3. Untersuchungsansatz

Den Untersuchungen liegt der Konvergenzansatz zugrunde. Dieser Ansatz geht von der Tatsache aus, dass der Abfluss eines Einzugsgebietes am Wasserscheidendurchbruch, bzw. in einem Karstgebiet an einer Quelle, konvergiert. An diesem Punkt sind im Abfluss verschlüsselt Informationen über das Einzugsgebiet enthalten (LEIBUNDGUT 1984:152). Es gilt nun diesen "Code" zu knacken und daraus möglichst viele Informationen über die Vorgänge im Einzugsgebiet und im unzugänglichen Karstwassersystem zu gewinnen. Der Konver-

genzansatz verwendet damit ein "Black-box"-Modell: Eine Eingangsgrösse wird über eine Systemfunktion in eine Ausgangsgrösse umgesetzt.

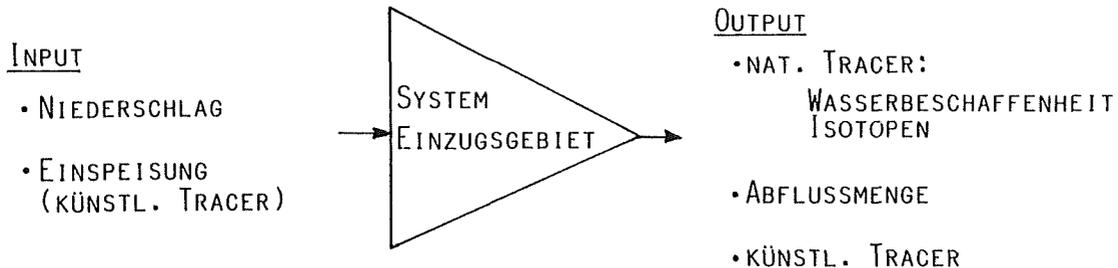


Abb. 4.4: Konvergenzansatz (nach LEIBUNDGUT 1986:29)

In Abbildung 4.4 sind die bei den Untersuchungen berücksichtigten Ein- und Ausgangsgrössen aufgelistet. Detaillierte Angaben zu den einzelnen Parametern und ihrer Erhebung bzw. Bestimmung sind den betreffenden Kapiteln zu entnehmen.

Eine zentrale Rolle bei den Untersuchungen im Alpstein spielten die Markierversuche. Es wird ein künstlicher Input bekannter Grösse eingegeben, der gemessene Output liefert Informationen über das System. Im Falle von Karstwassersystemen ist oft bereits die Entwässerungsrichtung, die in den meisten Einzugsgebieten aus topographischen Karten entnommen werden kann, nicht ohne detaillierte Untersuchungen (z.B. Markierversuche) bestimmbar. Der künstliche Input eines Tracers liefert punktuelle Ergebnisse. Man erhält Informationen über die Art einer Verbindung zwischen zwei Punkten (Einspeisungsstelle-Probenahme-stelle) im Zeitraum von Einspeisung und Nachweis des Markierstoffes. Die Uebertragung dieser Ergebnisse auf die Fläche ist nicht ohne weiteres möglich. Im Alpstein ist dazu neben den Kenntnissen der Geologie insbesondere die Bestimmung der Abflussmenge zugezogen worden, die von der Einzugsgebietsgrösse abhängt, aber auch von wechselnden Niederschlags- und Verdunstungsverhältnissen beeinflusst wird. Die hydrochemischen Untersuchungen und das Abflussverhalten lassen Rückschlüsse auf den Speicher und das Speicherverhalten zu. In Tabelle 4.3 sind die Aussage-möglichkeiten der einzelnen Messparameter zusammenge-stellt.

Die im vorherigen Kapitel dargelegten Modellvorstellungen eines Karstwassersystems zeigen, dass die "Black-box" nicht ganz schwarz ist. Es sind Kenntnisse über die Funk-

tionsweise der verschiedenen beteiligten Systeme vorhanden. Auf Grund dieser Kenntnisse kann der "Black-box"-Ansatz erweitert werden.

Tab. 4.3: Interpretationsmöglichkeiten der Messparameter

		Datenerfassung		
		Abfluss	Wasserbeschaffenheit	Markierungsversuche
Information über das Einzugsgebiet	Fläche	mittl. Jahresabfluss		Abgrenzung des Einzugsgeb., Nachweis hydrologischer Verbindungen
	Lage	Jahresgang	Einfluss von Speicherelementen (z.B. Seen)	
	Speicher, Fließverhältnisse	Analyse der Ganglinie (Rezession)	Analyse des Jahresganges Isotopen	Tracerdurchgänge

Dazu sind Kenntnisse über das Einzugsgebiet nötig. Für ein Karstgebiet ist dabei allerdings erschwerend, dass eine dreidimensionale Betrachtungsweise notwendig ist. Die Messgrößen der Oberfläche wie Vegetation (Wald, Weide, Fels), Wasserfläche (Seen), Höhenlage und Gesteinsuntergrund sind einfach zu erheben. Aussagen und Parameter über den mächtigen Karstaquifer sind aber schwierig zu erfassen.

Die Gesamtschau der Messresultate und der Kenntnisse hydrogeographischer Einzugsgebietsfaktoren erlaubt es dann Modellvorstellungen über das Einzugsgebiet zu erarbeiten. Diese können für praktische Anwendungen und Gewässerschutzmassnahmen entweder direkt nutzbar sein, oder sie erlauben Ansatzpunkte für eine Uebertragung und für notwendige, detailliertere Zusatzuntersuchungen im Hinblick auf konkrete, anstehende Probleme.

4.4. Untersuchungsprogramm

Die Untersuchungen folgten einem Ablauf, wie er sich bereits in verschiedenen Projekten bewährt hatte (z.B. LEIBUNDGUT 1986a:12). Ein detailliertes Untersuchungsprogramm, das weitgehend eingehalten werden konnte, ist am Anfang der Untersuchungen vorgelegt worden. Abbildung 4.5 zeigt den Ablauf der einzelnen Teilschritte.

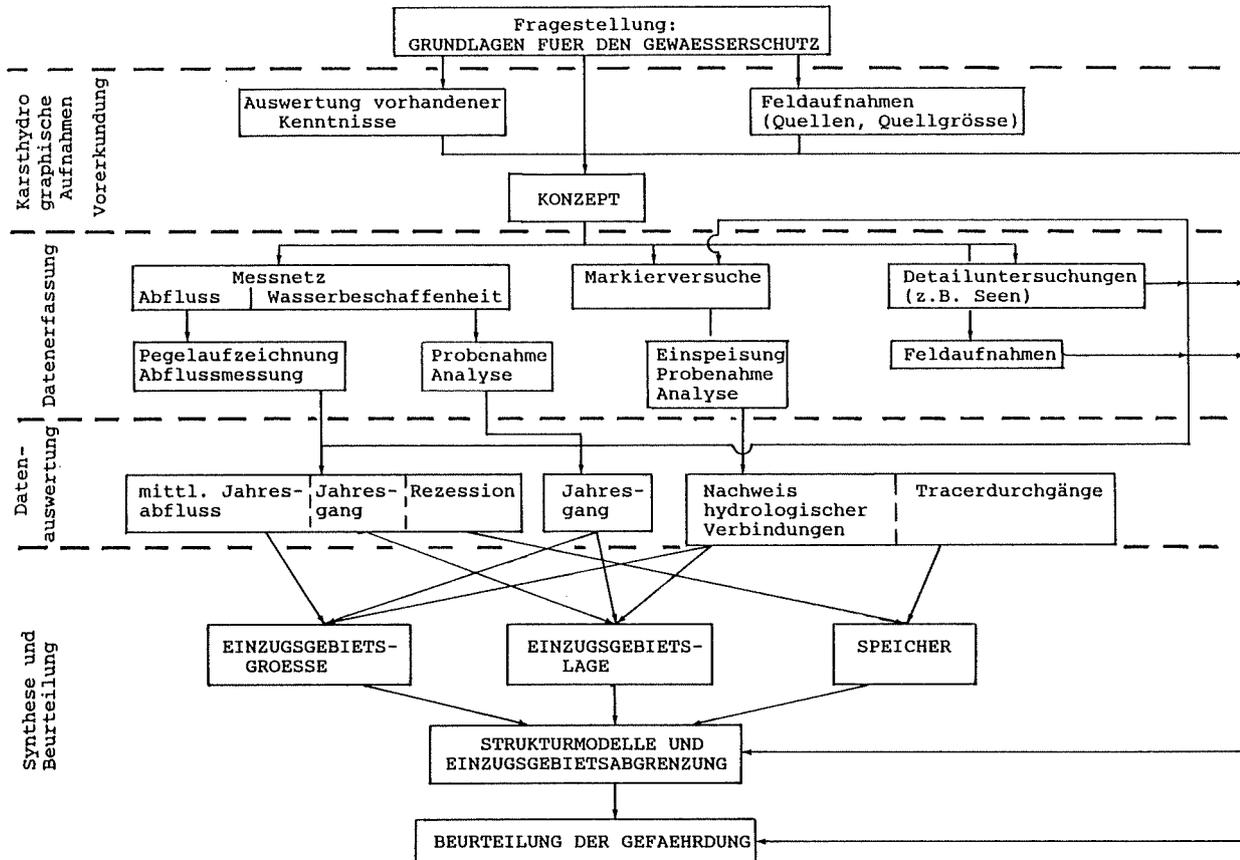


Abb. 4.5: Untersuchungsablauf

Die karsthydrographischen Aufnahmen führten zum Untersuchungskonzept. Es wurde in Anbetracht der bekannten Schwierigkeiten in Gebirgsräumen auf die Errichtung eines Niederschlagsmessnetzes verzichtet. Dieser Entscheid fiel umso leichter als beim Untersuchungsgebiet kein geschlossenes Einzugsgebiet, sondern ein nach allen Seiten offener Gebirgsstock vorliegt, und somit die Erstellung einer Wasserbilanz fast unmöglich ist. Die Umsetzung der Ergebnisse der Abflussmessungen auf die Einzugsgebietsfläche wurde daher direkt über eine mittlere Abflusspende vollzogen, die auf Grund von Uebertragungsfunktionen aus andern Gebieten ermittelt wurde.

Die ersten Resultate aus der Datenerfassungsphase hatten noch Einfluss auf die Detailplanung der Markierversuche, da die Datenauswertung bereits parallel anlaufen konnte. Für die Umsetzung der Resultate entscheidend ist der Syntheseschritt. Die Gesamtschau der Ergebnisse ermöglicht eine optimale Nutzung und gegenseitige Ueberprüfung. Der zeitliche Ablauf der einzelnen Schritte ist aus der Abbildung 4.6 ersichtlich.

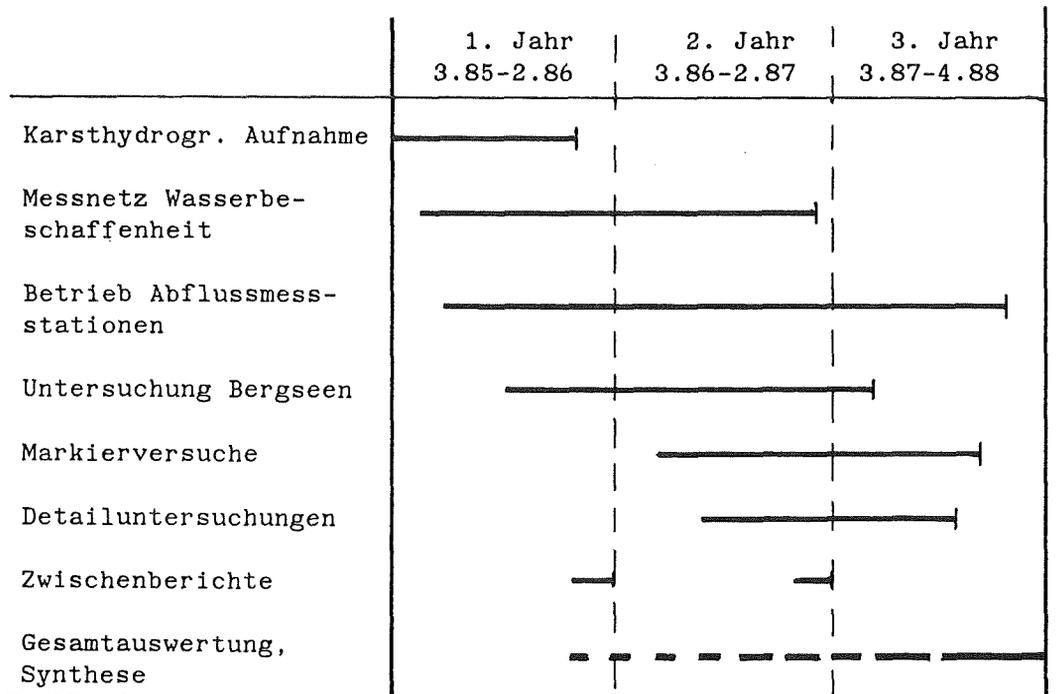


Abb. 4.6: Zeitplan

5. MESSNETZE UND DATENERHEBUNG

5.1 Karsthydrographische Aufnahmen

Um sich einen Ueberblick der Hydrologie des Säntisgebietes verschaffen zu können, war vorerst eine Aufnahme der Quellen und des Gewässernetzes nötig. Das Studium der vorhandenen Unterlagen, die Kenntnisse gebietskundiger Fachleute und eigene Feldbegehungen erlaubten es dann, die Schwerpunkte der weiteren Untersuchungen zu setzen. Diese haben sich teilweise aber auch schon aus dem Untersuchungsprogramm zum Projekt ergeben. Quellen und Gewässernetz sind in der "Hydrogeographischen Karte des Alpsteins" (Beilage) enthalten, sie zeigen die Grundzüge der Hydrographie des Alpsteins. Die verzeichneten Quellen beruhen auf folgenden Grundlagen:

- Quellinventare der Kantone
- Geol. Atlas der Schweiz 1:25'000, Atlasblatt 78: Säntis
- Geol. Karte des Säntisgebietes 1:25'000, Beitr. Geol. K. Schweiz, Spez. K. 38, 1904
- Geol. Karte vom Westende des Säntisgebirges 1:25'000, Beitr. Geol. K. Schweiz, Spez. K., 1904
- Geol. Karte der Gebirge am Walensee 1:25'000, Beitr. Geol. K. Schweiz, Spez. K. 44, 1908
- Eigene Erhebungen

Die Bearbeiter dieses Grundlagenmaterials haben verständlicherweise unterschiedliche Kriterien zur Aufnahme von Quellen angewandt. Nicht alle kartierenden Geologen hatten dasselbe hydrologische Interesse und die Quellinventare der Kantone beschränken sich meist auf gefasste Quellen. Deshalb muss die unterschiedliche Quelldichte vorsichtig interpretiert werden. Eine Interpretation dieser hydrographischen Uebersicht findet sich in Kapitel 6.

5.2. Abfluss

5.2.1 Abflussmessstationen

Um eine quantitative Auswertung der Markierversuche und eine Abschätzung der Einzugsgebietsgrösse zu ermöglichen, sind im Rahmen der Untersuchungen neun Abflussmessstatio-

nen errichtet worden. Im weiteren konnte auf bereits bestehende Stationen zurückgegriffen werden. Die längeren Messreihen erlauben eine gute Einordnung der Resultate der neuen Stationen mit nur zweijährigen Messreihen.

Die Schwimmerpegel sind alle mit Monatsstreifen betrieben worden (Vorschub 0.5 mm/h). Einzig die Station Sämtisthurlau ist im Winter 86/87 wegen der schlechten Zugänglichkeit auf einen geringeren Vorschub umgerüstet worden. Die Druckwaage am Brüelbach war mit einem Schreiber mit grösserem Vorschub (2,5 mm/h) ausgestattet. Die Geräte auf der Appenzeller Seite sind von M. Fischer betreut worden, jene im Toggenburg von den Herren P. Tschanz, M. Moser, A. Tobler, H. Schmid (AWE St. Gallen) und K. Schaller (Rheinbauleitung Rorschach).

In die Messperiode fiel das eher trockene Jahr 1986 mit Abflüssen 10-25 % unter dem langjährigen Mittel und das nasse Jahr 1987 mit einem regnerischen Frühsommer. Die Geräte waren in beiden Jahren ohne grössere Störungen in Betrieb. Einzig beim Schreibpegel in der Fassung der Gätteriquellen mussten wegen der hohen Feuchtigkeit einige Ausfälle verzeichnet werden. Einige wenige Tage ohne Aufzeichnung traten auch beim Brüelbach-Pfannenstiel auf. Diese Datenlücken konnten aber ohne grössere Probleme auf Grund der Aufzeichnungen benachbarter Stationen ergänzt werden. Ausser beim Tschuder-Wasserauen liegen zweijährige Messreihen vor. Bei der Quelle Mülibach-Alt St. Johann wurde im August 1987 das Gerinne durch Bauarbeiten völlig verändert, und es konnte für den Rest des Jahres keine neue P/Q-Beziehung mehr erstellt werden.

5.2.2 Eichung, Auswertung

Für die Bestimmung der P/Q-Beziehungen sind insgesamt rund 120 Abflussmessungen durchgeführt worden. Die Messungen erfolgten mit dem hydrometrischen Flügel und nach der Verdünnungsmethode.

An vielen Stellen erlaubte nur die Verdünnungsmethode zuverlässige Abflussmessungen. Es wurde die Integrationsmethode angewendet. Möglichst als Dirac'scher Stoss wird dem Fliessgewässer ein Markierstoff, in diesem Fall eine konzentrierte Kochsalzlösung zugegeben. Nach einer genügend langen Fliessstrecke, die eine gute Mischung erlauben muss, wird die Salzkonzentration kontinuierlich gemessen. Die

Messung erfolgt über die Leitfähigkeit, die mittels eines Eichkoeffizienten die Umrechnung in eine Chlorid-Konzentration erlaubt. Die Umrechnung und Integration über die Zeit erfolgt über einen Taschencomputer, der am Leitfähigkeitsgerät angeschlossen ist und direkt im Felde die Abflussmenge errechnet (LUDER 1986). Die Anwendung dieser Methode ist äusserst effizient, da sie eine direkte Auswertung erlaubt und im Felde keine aufwendigen Installationen erfordert.

Tab. 5.1: Abflussmessstationen

Neu errichtete Stationen:						
Gewässer, Messstation	Koordinaten	Höhe	Beobachtungsmethode Instrumente	ausgewertete Periode	betreut von	Nr. in Karte
Thur-Bürgerheim	738440/228010	878.67	Schwimmerpegel, Flügel	Okt.85-Dez.87	GIUB, SG	11
Säntisthur-Lau	742345/231320	1069	Schwimmerpegel, Flügel	Okt.85-Dez.87	GIUB, SG	8
Pumpwerk-Alt St. J.	739515/228560	887	Salzverdünnung Schwimmerpegel, Flügel	Okt.85-Dez.87	GIUB, SG	16
Mülibach-Alt St. J.	739480/228620	892	Salzverdünnung Schwimmerpegel, Salzverdünnung	Okt.85-Aug.87	GIUB, SG	15
Dorfbach-Alt St. J.	739755/928700	888	Schwimmerpegel, Salzverdünnung	Okt.85-Dez.87	GIUB, SG	14
Gätterli-Wasserauen	749550/238250	915	Schwimmerpegel, volumetrisch	Juli 85-Dez.87	GIUB, MF	2
Schwendebach-EW	749750/238350	905	Schwimmerpegel, Salzverdünnung	Juli 85-Dez.87	GIUB, MF	3
Schwendebach-Ditzes	750830/239820	851	Schwimmerpegel, Flügel	Juli 85-Dez.87	GIUB, MF	4
Brüelbach-Pfannenstiel	753100/239180	940	Druckwaage, Salzverdünnung	Aug.85-Dez.87	GIUB, MF	5
Bestehende Stationen:						
Thur-Stein, Iltishag	736020/228250	850	Schwimmerpegel, Verdünnung	1964 - 87	L+H	12
Simmi-Gams	749560/229020	702	Schwimmerpegel, Flügel	1967 - 80	L+H	13
Sitter-Appenzell	749040/244220	769	Druckwaage, Flügel	1923 - 85	L+H	
Urnäsch-Hundwil	740170/244800	747	Schwimmerpegel, Verdünnung	1962 - 85	L+H	
Thur-Klostobel	741130/228810	897	Schwimmerpegel, Flügel	1981-83, 86, 87	SG	10
Säntisthur-Unterswasser	741700/229060	902	Schwimmerpegel, Flügel	1981-83, 85-87	SG	9
Thur-Hotel Säntis	742100/228950	917	Schwimmerpegel, Flügel	1981-83	SG	7
Thur-Munzenriet	744330/229300	1013	Schwimmerpegel, Flügel	1981-83	SG	6
Tschuder-Wasserauen	750450/239530	890	Druckwaage, Flügel Salzverdünnung	Juli 85-Dez.86	MF	1

GIUB Geogr. Inst. Uni Bern
Abt. Phys. Geogr.-Gewässerkunde

SG Amt für Umweltschutz,
Kt. St. Gallen

L+H Landeshydrologie und -geologie

MF Martin Fischer, Appenzell

Nicht einfach, aber für die Güte der Messung entscheidend, ist die Wahl einer geeigneten Messstrecke. DYCK (1980:421) unterscheidet ausgehend von einer Impfung in der Flussmitte sechs charakteristische Phasen der Ausbreitung von Tracerimpulsen in Fließgewässern:

1. Initialphase:
Die molekulare Diffusion kann hier noch nicht vernachlässigt werden.
2. Phase der freien turbulenten Diffusion:
Es findet dreidimensionale turbulente Diffusion statt, ohne dass die Wolke die Flusstiefe erfüllt.
3. Diffusions-Dispersions-Phase (vertikale Homogenität):
Die Tracerwolke erfüllt die Flusstiefe, aber noch nicht die Flussbreite.
4. Taylor-Phase (transversale Homogenität):
Die Tracerwolke erfüllt auch die Flussbreite.
5. Translations-Diffusions-Phase:
Es besteht kaum noch ein Gradient der Konzentration über die Flussbreite.
6. Longitudinale Homogenität:
Das Translations-Diffusionsmodell gilt nicht mehr, da es unendlich hohe Reaktionsgeschwindigkeit voraussetzt.

Die Messung der Tracerkonzentration darf frühestens in der Phase der transversalen Homogenität erfolgen. Allzu lange Messstrecken sind aber auch wenig sinnvoll, da sie die Messdauer erhöhen und die Messgenauigkeit beeinträchtigen (Infiltration, zu geringer Konzentrationsanstieg, variable Abflussmenge). Die Messstrecke kann auch wegen der Zuflussverhältnisse nicht beliebig lang gewählt werden. Für die Berechnung der notwendigen Mischstrecke gibt es verschiedene Formeln, die aber nicht immer zuverlässig sind (BUS 1982:87). Die Festlegung der Mischstrecke basiert deshalb oft auf Erfahrung und/oder wiederholten Messungen, allenfalls auch mittels dem Einsatz von Fluoreszenztracern.

Die Gewässer des Alpsteins, wo nach der Verdünnungsmethode gemessen wurde, eigneten sich im allgemeinen gut, da ihr Gefälle und die entsprechende Turbulenz zu einer raschen Durchmischung führten.

Die P/Q-Beziehungen veränderten sich im Verlaufe der Messperiode nur bei einigen Stationen. Bei fünf der neu errichteten Stationen konnte die Sohle baulich stabilisiert werden. Zudem waren in der Messperiode im Untersuchungsgebiet keine übermäßigen Hochwässer zu verzeichnen. Demgegenüber muss bei der bestehenden Station Sämtisthur-Unterswasser mit einer Veränderung der P/Q-Beziehung von 1981 gerechnet werden. Die Auswertung der Pegelaufzeichnungen erfolgte auf Tagesmittelwerte.

5.2.3 Ablespegel

Um eine bessere Uebersicht der Abflussmengen der zahlreichen Quellen in Alt St. Johann zu erhalten, sind neben den drei Limnigraphen auch sieben Ablespegel (Tab. 5.2) an kleineren Austritten eingerichtet worden. Von diesen Stationen interessieren in erster Linie die mittleren Jahresabflüsse, die zur Abschätzung der EG-Grösse dienen. Es

Tab. 5.2: Ablespegel

Gewässer, Messstation	Koordinaten	Höhe	ausgewertete Periode	Nr. in Karte
Bach-Käserei, Stofel	740 825/228 915	897	Nov. 85-Dez. 87	22
Schiessbach-Schützenhaus	740 485/228 905	897	Aug. 85-Dez. 87	23
Schäflibach	739 860/228 685	888	Nov. 85-Dez. 87	17
Vorderer Bach	739 785/228 680	887	Nov. 85-Dez. 87	18
Gerinne b. Looser	739 410/228 555	887	Nov. 85-Dez. 86	19
Gerinne b. Brändle	739 260/228 460	886	Nov. 85-Dez. 87	20
Gerinne b. Bürgerheim	738 340/227 985	880	Nov. 85-Dez. 87	21

zeigte sich, dass zwischen den 14-tägigen Abflusswerten und den entsprechenden Werten der Limnigraphenstationen Dorfbach-Alt St. Johann bzw. Thur-Bürgerheim ein linearer Zusammenhang besteht. Auf Grund der ermittelten Regressionsbeziehungen der 14-tägigen Werte sind die Jahresmittelwerte der Ablespegel unter Einsetzen des Jahresmittelwerts

Tab. 5.3: Ermittlung des mittleren jährliche Abflusses (methodischer Vergleich)

Station, Jahr	Ermittlungsverfahren				
	arithmet. Mittel ¹		Regression ²		Limnigraph ³
	l/s	Fehler%	l/s	Fehler%	
Dorfbach- 86	293	12	352	6	332
Alt St.J. 87	423	10	466	1	469
Thur- 86	796	26	1038	4	1080
Klostobel 87	1266	16	1569	4	1512

¹ arithmetisches Mittel 14-tägiger Werte

² Bestimmung des Jahresmittels an Hand einer Regressionsgleichung zur Station Thur-Bürgerheim. Sie ist auf Grund 14-tägiger Werte bestimmt worden.

³ Wert bestimmt aus kontinuierlicher Aufzeichnung

der Bezugsstation (Dorfbach-Alt St. Johann bzw. Thurbürgerheim) errechnet worden. Bei diesem Verfahren entspricht der ermittelte Jahresmittelwert besser dem wirklichen Wert als bei einer arithmetischen Mittelbildung der zufälligen Pegelablesungen. In Tabelle 5. 3 sind die Jahresmittelwerte auf Grund der verschiedenen Bestimmungsverfahren für zwei Stationen mit kontinuierlicher Aufzeichnung durchgerechnet. Die Werte zeigen, dass das Regressionsverfahren signifikant bessere Werte liefert als die arithmetische Mittelbildung.

5.3. Untersuchungen der Wasserbeschaffenheit

Zu Beginn der Untersuchungen sind eine grosse Anzahl von Quellen beprobt worden, um allfällige Leitparameter zu finden, die eine Gliederung erlauben. Nachher sind die Analysen auf fünf grössere Quellen beschränkt worden:

- Gätterli-Wasserauen
- Tschuder-Wasserauen
- Pfannenstiel-Brülisau
- Mühlebach-Sennwald
- Pumpwerk-Alt St. Johann

Hier sind von April 1985 bis Dezember 1986 etwa allmonatlich Proben entnommen worden. Es sind folgende Parameter bestimmt worden:

Tab. 5.4: Untersuchungen der Wasserbeschaffenheit

Parameter	Gerät, Methode	Genauigkeit
Temperatur	WTW LF 91	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
El. Leitfähigkeit	WTW LF 91	$\pm 3 \text{ uS}$
pH-Wert		± 0.1
Gesamthärte	Komplexometrische Titration mit Farbindikator	$\pm 0.1^{\circ}\text{fH}$
Calcium	Komplexometrische Titration mit Fluoreszenzindikator	$\pm 0.1^{\circ}\text{fH}$
Magnesium	rechnerisch aus Differenz Gesamthärte- Calcium	

Säureverbrauch (Karbonathärte)	Acidimetrische Titration auf pH 4.3	±0.1 °fH
Chlorid	Fällungstitration mit Silbernitratlösung, Endpunktsindikation mit Silbersulfid-Elektrode	±0.1 mg/l
Sulfat	Fällung mit Bariumchlorid, Trübungsmessung mit HACH-Fotometer	±0.5 mg/l
Nitrat	Salizylatmethode Mes- sung der Färbung mit Metrohm-Fotometer mit Lichtleitung	±0.4 mg/l

Bei einigen Quellen sind Geräte zur kontinuierlichen Aufzeichnung von Temperatur und/oder Leitfähigkeit eingesetzt worden:

Pumpwerk-Alt St. Johann:

Temperatur 12. Mai - 1. Dezember 1986

Leitfähigkeit 12. Mai - 25. Oktober 1986

Gätterli-Wasserauen:

Temperatur 10. Mai - 10. Oktober 1986

Zur Messung kurzfristiger Schwankungen in der Mineralisation sind auch automatische Probenehmer eingesetzt worden:

Gätterli-Wasserauen:

Leitfähigkeit 12. Juli- 11. September 1985

Tschuder-Wasserauen:

Leitfähigkeit 24. Juli- 30. August 1985

Insgesamt liegen 143 Wasseranalysen der in Tabelle 5.4 aufgeführten Parameter vor. Eine rund doppelt so hohe Anzahl von Messungen liegt für Temperatur und Leitfähigkeit vor.

Zu Uebersichtszwecken sind auch die Umweltisotope Tritium und $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ bei einigen Proben vom Physikalischen Institut der Uni Bern, Abt. LLC untersucht worden.

5.4. Untersuchung der Bergseen

Der Seealp-, Säntiser- und Fälensee sind im Rahmen der Diplomarbeit von Th. Reutimann detailliert untersucht worden. Die Untersuchungen gliederten sich folgendermassen:

Morphologie der Alpsteinseen:

Aufnahme der Seebodentopographie, Bestimmung der morphometrischen Kennwerte.

Hydrologie:

Erfassen der Zu- und Abflussverhältnisse, z.T. problematisch, da unterirdische Zu- und Abflüsse, Abschätzung der Durchflutung.

Thermik:

Wärmehaushalt der Seen.

Wasserbeschaffenheit:

Untersuchung der Wasserinhaltsstoffe.

Ueber die Einzelheiten der durchgeführten Messungen kann auf die Diplomarbeit "Hydrologie der Alpsteinseen" (REUTIMANN 1987) verwiesen werden.

5.5. Markierversuche

5.5.1 Einspeisungen

Die Markierversuche bildeten einen zentralen Teil der Untersuchungen. Für das Projekt sind insgesamt zehn Einspeisungen von fluoreszierenden Markierstoffen vorgenommen worden. Die Aufteilung in zwei Serien erfolgte einerseits aus organisatorischen Gründen (grosser Aufwand für die Probenahme), andererseits drängte sie sich aus analytischen Gründen auf. Die Zahl verfügbarer, verschieden fluoreszierender Markierstoffe ist beschränkt. Der gleiche Markierstoff darf aber nur an zwei verschiedenen Stellen eingesetzt werden, wenn mit Sicherheit feststeht, dass keine Ueberschneidungen auftreten werden, die eine eindeutige Zuordnung von Einspeisungsstelle und Tracernachweisstelle zur Spekulation werden lassen.

Die Einspeisungen sind jeweils möglichst simultan anfang Juli, also bei recht hoher Wasserführung im Karstwassersystem durchgeführt worden. Dieser Zeitpunkt ermöglichte eine zuverlässige Einspeisung auch an Stellen ohne perennierende Wasserführung. An einigen Stellen mussten die Einspeisungen aus hydrologischen und technischen Gründen etwas später durchgeführt werden.

5.5.2 Verwendete Markierstoffe

Für die Markierversuche sind durchwegs fluoreszierende Tracer eingesetzt worden, die sich als Markierstoffe in Karstaquiferen sehr gut bewährt haben (LEIBUNDGUT 1982: 23ff). Sie erfüllen die Anforderungen, die an einen Markierstoff gestellt werden müssen (nach LEIBUNDGUT 1986:10):

1. gute Wasserlöslichkeit
2. hohe Fluoreszenzintensität, niedere Nachweisgrenze
3. günstiges Sorptionsverhalten
4. geringe Umweltbelastung
5. chemische Stabilität
6. geringe Lichtempfindlichkeit
7. geringe pH-Abhängigkeit
8. geringe Temperaturabhängigkeit
9. Lagerungstabilität
10. Möglichkeit der Auftrennung von Tracergemischen

Die Fluoreszenztracer erlauben einen rationellen, quantitativen Nachweis. In Tabelle 5.5 sind die verwendeten Tracer und ihre wichtigsten Eigenschaften zusammengestellt. Uranin, Eosin und Rhodamin sind Markierstoffe, die bereits vielfach in unterschiedlichsten Markierversuchen eingesetzt worden sind. Entsprechend sind ihre Stärken und Schwächen gut bekannt und in der Fachliteratur dokumentiert.

Demgegenüber liegen für das Naphthionat noch relativ wenig Erfahrungen vor. Der Markierstoff wurde vom Geographischen Institut der Uni Bern 1984 das erste Mal eingesetzt. Durch seine spektralen Eigenschaften ist ein problemloser Nachweis neben Uranin, Eosin und Rhodamin möglich. Naphthionat kann als Ersatz für die früher verwendeten Tinopale eingesetzt werden, die wegen ihrem Vorkommen in Waschmitteln

und schlechten Sorptionseigenschaften problematisch sind. Schüttelversuche im Labor ergaben für Naphthionat ein ähnlich günstiges Adsorptionsverhalten wie für Uranin (WERNLI 1986). Die bisherigen Feldversuche ergaben sehr gute Re-

Tab. 5.5: Verwendete Tracer

Tracer	Excitation/ Emmission (nm)	rel. Fluoreszenz- ausbeute (%)	Nachweis- grenze (mg/m ³)
Uranin	491/516	100	0.001
Eosin	515/540	15	0.005
Rhodamin	538/578	15	0.005
Naphthionat	325/420	20	0.5

sultate mit Naphthionat. Ein gewisser Nachteil des Naphthionats ist die schlechte Nachweisgrenze trotz der relativ hohen Fluoreszenzausbeute. Die Ursache liegt im hohen Messuntergrund in diesem Spektralbereich, welcher bei der Analyse nur noch geringe Messsignalverstärkungen zulässt (WERNLI 1986:18).

5.5.3 Probenahme

Es ist bei solch grossen Versuchsgebieten nicht möglich ein beliebig dichtes Netz an Probenahmestellen mit grosser Beprobungsfrequenz zu errichten. Für die Planung der arbeitsintensiven Probenahme ist die Annahme von Hypothesen über das Versuchsergebnis nötig. Je besser die Hypothesen der Realität entsprechen, desto bessere Versuchsergebnisse können erzielt werden. Stellen, wo Hauptdurchgänge erwartet werden, müssen intensiv beprobt werden. Andere Stellen werden nur gelegentlich beprobt oder mittels Aktivkohle überwacht.

Die intensive Probenahme wurde insbesondere durch **automatische Probenehmer** sichergestellt. Die Geräte haben ein Fassungsvermögen von 42 Flaschen (100 ml). Das Probenintervall kann beim eingesetzten Typ frei zwischen 15 Minuten und einem Tag gewählt werden. Das Intervall ist beim Flaschenwechsel leicht zu ändern. Die Geräte arbeiten mit

einem Akku und können so netzunabhängig eingesetzt werden. Das Wasser wird mittels einer Schlauchquetschpumpe aus dem Gewässer entnommen und nach einer Spülzeit (entsprechend der Schlauchlänge einstellbar) in die Flaschen abgefüllt. In diesem Versuch sind Braunglasflaschen eingesetzt worden, die eine Lagerung der Proben ohne Konzentrationsänderung durch Adsorption und Zersetzung (Lichteinfluss) erlauben.

An einer grossen Zahl von weiteren Stellen sind Direktproben von Hand entnommen worden. An einzelnen Quellen ist dies von Einheimischen durchgeführt worden, an zahlreichen weiteren Stellen nach Bedarf durch Mitarbeiter und freiwillige Helfer des Projekts.

Zur Abdeckung des negativen Rahmens, d.h. zur Ueberwachung derjenigen Stellen, wo mutmasslich keine Tracerdurchgänge zu erwarten sind, können **Aktivkohlesäckchen** eingesetzt werden. Die Aktivkohlesäckchen werden einige Zeit ins fliessende Wasser eingehängt. Spuren des Markierstoffes werden dann in der Aktivkohle adsorbiert. Dieser Markierstoff kann im Labor eluiert und nachgewiesen werden. Dieses Verfahren erlaubt aber bestenfalls einen halbquantitativen Nachweis. Ausbringraten können damit nicht errechnet werden (LEIBUNDGUT 1985).

5.5.4 Analyse

Bei den Direktproben (abgefüllte Probeflaschen) kann die Tracerkonzentration direkt gemessen werden. Zur Ueberwachung des Versuchsablaufes sind im Feldlabor (in Appenzell bzw. Alt St. Johann) Analysen auf einem Spektralfluorometer durchgeführt worden. Für die eigentliche Versuchsauswertung stand am Geographischen Institut ein Spektralfluorometer Perkin Elmer 3000 zur Verfügung. Entsprechend dem nachzuweisenden Markierstoff wird das Spektrum mit konstantem Wellenlängenabstand abgefahren (Doppelscanningverfahren). Die Untersuchung auf die Markierstoffe Uranin, Eosin und Rhodamin kann so in einem Arbeitsgang erfolgen. Für Naphthionat ist ein anderer Wellenlängenabstand erforderlich. Das Doppelscanningverfahren erlaubt eine gute Abtrennung des Messuntergrundes und damit eine präzise quantitative Auswertung.

Beim gleichzeitigen Auftreten von Uranin und Eosin oder Eosin und Rhodamin überlagern sich die Spektralkurven.

Dies verunmöglicht einen direkten quantitativen Nachweis der beiden Tracer. Es gibt zwei Möglichkeiten trotzdem quantitative Ergebnisse zu erhalten:

- Probenbehandlung, die zur Löschung der Fluoreszenz des einen Tracers führt.
- Rechnerische Auftrennung der überlagerten Spektralkurven.

Bei der Probenbehandlung nutzt man die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Markierstoffe:

pH-Abhängigkeit:

Nachweis von Eosin neben Uranin durch definiertes Ansäuern auf pH 5 bis 5,2 (BEHRENS 1982:43).

Lichteinfluss:

Nachweis von Uranin neben Eosin durch Ansäuern, Belichten, Alkalisieren (WERNLI, in LEIBUNDGUT 1985).

Nachweis von Rhodamin neben Eosin, durch Belichten.

Adsorptionsverhalten:

Nachweis von Eosin neben Rhodamin, Perkolation durch Glimmersand, Adsorption von Rhodamin (BEHRENS 1982:45).

Bei grosser Probenzahl werden diese Laborverfahren rasch zeitraubend. Sie bilden aber bei grossen Konzentrationsunterschieden der nachzuweisenden Markierstoffe die einzige Möglichkeit für einen quantitativen Nachweis.

Bei günstigen Konzentrationsverhältnissen kann ein rechnerisches Verfahren angewandt werden. Bei den Markierversuchen 1986 und 1987 traten gleichzeitig die beiden Markierstoffe Uranin und Eosin auf. Dank den günstigen Konzentrationsverhältnissen konnte die Auftrennung rechnerisch erfolgen. Die Berechnung der Konzentrationen erfolgte nach der Formel von KAESS (1982:51ff), die auf die verwendeten Markierstoffe und das Spektralfluorometer Perkin Elmer 3000 geeicht wurden. Die Auflösung der zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten muss mit den jeweiligen Eichergebnissen erfolgen:

$$\begin{aligned}FU &= CU + (CE * K * ZE) \\FE &= (CE * K) + (CU * ZU)\end{aligned}$$

CU; CE: Konzentration von Uranin bzw. Eosin (in Skalenteilen)

- FU; FE: Fluoreszenzintensität beim Maximum von Uranin bzw. Eosin (in Skalenteilen)
K: Fluoreszenzausbeute für Eosin im Vergleich zu Uranin.
ZE: Anteil der Eosinfluoreszenz bei der Uranineinstellung zur Eosineinstellung.
ZU: Anteil der Uraninfluoreszenz bei der Eosineinstellung zur Uranineinstellung

Die Umrechnung der Geräteanzeige (Skalenteile) in Konzentrationen (mg/m^3) erfolgt über die Eichkurve des Uranins. An Eichgemischen durchgeführte Messungen ergaben Bestimmungsfehler $<5\%$ bei einigermaßen günstigen Konzentrationsverhältnissen (Uranin:Eosin=1:4 bis 1:5).

5.5.5 Bestimmte Kenngrößen der Tracerdurchgänge

Für die einzelnen Tracerdurchgänge sind eine Reihe von Kenngrößen zu ihrer Charakterisierung ermittelt worden, sofern die nötigen Daten aus einer vollständigen Erfassung der Durchgangskurve vorlagen.

Die ausgebrachte Tracermenge lässt sich aus der gemessenen Konzentrations-Zeit-Kurve und der zugehörigen Abflusskurve berechnen. Das Produkt aus Konzentration (in mg/m^3) und Abflussmenge zum Zeitpunkt der Probenahme (in m^3/s) entspricht der momentanen Fracht (mg/s). Durch Integration über die Zeit kann die wiedergefundene Menge des Markierstoffes bestimmt werden:

$$M = \int_0^{\infty} Q(t) \cdot C(t) dt$$

M: ausgebrachte Tracermenge

Q(t): Abfluss zum Zeitpunkt t

C(t): Tracerkonzentration zum Zeitpunkt t

Die maximale Abstandsgeschwindigkeit v_{amax} wird aus der Zeit des ersten Auftretens des Markierstoffes und des Abstandes (Luftlinie) zwischen Einspeise- und Probenahmepunkt ermittelt. Für v_{aint} wird der Zeitpunkt der maximalen Tracerkonzentration eingesetzt.

Die Ermittlung der mittleren Fließgeschwindigkeiten erfolgte unter Anwendung eines Dispersionsmodells, obwohl

bei den hydrologischen Verhältnissen in einem Karstwassersystem nicht nur die hydrodynamische Dispersion, sondern auch andere Vorgänge wie Turbulenz, Diffusion und Fließen in Nebenklüften eine Rolle spielen.

Eine mathematische Erfassung dieser Prozesse ist aber nicht möglich, da zu wenig Kenntnisse über den Fließweg vorliegen, die haltbare, vereinfachende Annahmen über das Fließen im Aquifer zulassen würden, wie dies beim Porengrundwasser möglich ist. Für den gesättigten Bereich könnten allenfalls bestehende Kluftmodelle angewendet werden. Im ungesättigten Bereich, wo mit turbulentem Fließen ähnlich einem Bergbach gerechnet werden muss, wird dies unmöglich. Alle diese Parameter, die zur zeitlichen Verteilung des Tracerdurchganges beitragen, werden bei Anwendung des Dispersionsmodelles unter dem Parameter "Dispersionskoeffizient D" subsummiert. Bei der eindimensionalen Vereinfachung des Dispersionsmodells ist folgende Lösung gültig:

$$C_{FF}(t) = \frac{m}{V} \frac{1}{\sqrt{4 D/vx (t/t_0)^3}} \exp \left[- \frac{(1-t/t_0)^2}{4 D/vx t/t_0} \right]$$

C_{FF} : Konzentration (Einspeisung und Messung in fließendem Wasser)

t : Zeit

x : Distanz

m : eingegebene Tracermenge an der Einspeisungsstelle

V : Volumenstrom

D : longitudinaler Dispersionskoeffizient

v : mittl. Abstandsgeschwindigkeit

t_0 : Verweilzeit des Tracers

(nach MALOSZEWSKI 1985)

Durch die Veränderung der beiden Parameter D/vx und t_0 erfolgt iterativ die Anpassung der theoretischen Kurve an die gemessene Tracerdurchgangskurve. Beim "curve fitting" wird insbesondere der Hauptdurchgang berücksichtigt, d.h.

der lange auslaufende Teil der Durchgangskurve wird abgeschnitten. Aus den beiden Parametern (D/v_x , t_0) lassen sich folgende Kenngrößen bestimmen:

$$\text{mittlere Abstandsgeschwindigkeit } v_{\text{amit}} \text{ (m/h)} = \frac{x}{t_0}$$

$$\text{longitudinaler Dispersionskoeffizient } D_L \text{ (m}^2\text{/s)} = D/v_x * v_{\text{amit}} * x$$

$$\text{Dispersivität (Dispersionslänge) } B_L \text{ (m)} = \frac{D_L}{v_{\text{amit}}}$$

Der Dispersionskoeffizient ist geschwindigkeitsabhängig. Deshalb wird die Dispersionslänge (Dispersivität) $B_L = D_L/v_{\text{amit}}$ ermittelt. Die Dispersionslänge (Dispersivität) widerspiegelt die hydrologischen Eigenschaften des Fließweges. Diese Werte können aber nur als deskriptive Parameter für die Form der Tracerdurchgänge betrachtet werden.

Für jene Stellen, wo auf Grund der Durchgangskurven das Dispersionsmodell nicht anwendbar ist, weil die Durchgangskurve zahlreiche Peaks aufweist, wurde die mediane Abstandsgeschwindigkeit ermittelt. Die mediane Abstandsgeschwindigkeit v_{amed} entspricht dem Quotienten aus Abstand und der Zeitdauer bis 50% der ausgebrachten Tracermenge abgeflossen sind. Die so ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten entsprechen dem statistischen Zentralwert.

Zu Vergleichszwecken mit anderen Versuchen wurde auch der Koeffizient $v_{\text{amax}}/v_{\text{amed}}$ bestimmt. Dieser Wert charakterisiert auch die Spreizung der Durchgangskurve und gibt Hinweise auf die Ausbildung des Fließweges (LEIBUNDGUT 1986:31).

6. QUELLEN UND GEWAESSERNETZ

Im folgenden wird versucht die Hydrographie des Alpsteins zu umreißen, wie sie sich aus den karsthydrographischen Aufnahmen der Quellen ergab. Diese Ergebnisse sind in der Hydrogeographischen Karte (Beilage) dargestellt.

6.1 Nordwesthang

Im Ueberschiebungsbereich der Säntis-Decke auf die subalpine Molasse, also am Fuss der steilen Felswände des Säntismassivs, übernimmt ein relativ dichtes Gewässernetz die Entwässerung, da die Molassegesteine hier gegenüber den Kalken des Alpsteins als Stauer wirken. Die topographische Situation verunmöglicht eine quantitative Aufnahme des Gesamtabflusses mit vertretbarem Aufwand. Als grössere einzelne Quellaustritte sind hier insbesondere die Tosbach- und die Berndlibachquellen bekannt. Daneben sind aber zahlreiche kleinere Austritte und Vernässungen vorhanden. Die Höhenlage dieser Ueberschiebung zwischen 1200 und 1400 m und die nach SE einfallenden Schichten der verschuppten Säntis-Zone sprechen gegen eine generelle Entwässerung in diese Richtung. In Anbetracht der grossen Niederschlagsmengen von über 2000 mm in diesem Gebiet reicht bereits ein kleines Einzugsgebiet für die Speisung dieser Quellen aus, kann doch mit einem spezifischen Abfluss von 50-60 l/s*km² gerechnet werden.

6.2. Oberes Toggenburg

Die Entwässerung des Obertoggenburgs erfolgt einerseits durch die Thur Richtung Westen und andererseits durch die Simmi ins Rheintal. Beide Abflüsse wurden bzw. werden von Stationen der Landeshydrologie erfasst (Station Simmi-Gams 1980 aufgehoben).

Station	Messperiode	mittl. Abfl. Periode
Thur-Stein, Iltishag	1964-82	4.17 m ³ /s
Simmi-Gams	1968-80	.47

Diese Werte zeigen, dass die Entwässerung durch die Thur weit wichtiger ist als jene durch die Simmi. Der Hauptanteil des Abflusses der Simmi stammt aus der oberflächlichen Entwässerung der Wildhauser Schuppenzone (sowohl der Churfürsten- wie der Alpsteinseite), die nicht der Karstentwässerung des Alpsteins zugerechnet werden kann. Die zahlreichen Quellen im Gamplüt und im Gebiet Schönenboden-Oberhag sind für die Entwässerung des Alpsteinmassivs von untergeordneter Bedeutung. Die Quellen bei Schönenboden-Oberhag treten in der moränenbedeckten Wildhauser Schuppenzone und an der Grenze zur Säntis-Decke aus. Im Übergangsbereich sind hier die obersten Kreideschichten und das Tertiär mit verschiedenen Mergeln aufgeschlossen. Diese Wasserstauer bewirken ein gehäuftes Auftreten kleinerer Quellen bereits innerhalb der Säntis-Decke. Die Quellen im Gamplüt dürften im Zusammenhang mit der geologisch nicht völlig geklärten Störungszone westlich des Wildhauser Schafbergs stehen. Sie sind aber relativ klein und übernehmen keinesfalls die gesamte Entwässerung des Gebietes Wildhauser Schafberg-Altman. Die Quellen südlich des Stein sind an die Mergel der Amdener Schichten gebunden.

Wichtig für die Entwässerung des Alpsteins sind die Quellen im Thureinzugsgebiet. Die bedeutende Abflussmenge der Säntisthur bei Unterwasser wird aus dem Karstwassersystem des Alpsteins gespiesen. Die Säntisthur wird vor allem von Quellen in der Thurwies und im Lauiboden gespiesen. Sie liegen in der komplexen, verschuppten Rotstein-Gräppelzone und treten im Schrackenkalk, z.T. auch im Valangian-Kalk aus. In dieser Zone liegen auch der Neuenalpbach und der Seebach. Ihr Einzugsgebiet dürfte sich aber auf das Hochtal von Oberlauri-Gräppelensee beschränken. Die aufgrund des topographischen Einzugsgebietes berechnete Abflussmenge des Seebaches in der Studie "Kleinwasserkraftwerke" (BWW 1984) scheint jedenfalls zu hoch. Zwischen Lauri und Chüeboden durchbricht die Säntisthur das Gulmengewölbe und stürzt durch das Chämmerlitobel in die weite Mulde des oberen Toggenburg.

Die Vermutung eines unterirdischen Abflusses des Gräppelensees konnte nicht bestätigt werden. Im Gegensatz zu Säntiser- und Fälensee ist sein Wasserspiegel auch nach dem trockenen Herbst 1985 nur wenig (ca. 10 cm) gefallen. Ein vorhandener Abfluss müsste demnach in Seespiegellage liegen. Hier lassen sich aber keinerlei Anzeichen einer Schwinde feststellen. 1 km südwestlich hingegen befindet sich die Schwinde Risi, die das Gräppelriet entwässert. Nach RUTISHAUSER (1919:18ff) kann diese Schwinde bei Hoch-

wasser auch zur Quelle werden, sie muss also in hydrologischer Verbindung mit einem höher gelegenen Einzugsgebiet stehen.

Die anderen rechtsseitigen Zuflüsse der Thur oberhalb Unterwasser sind alle eher unbedeutend. Grosse Wassermengen fliessen der Thur aber von den Quellen in Alt St. Johann zu.

6.3. Rheintal

Aufgrund der Höhenlage müsste das Alpsteinmassiv hauptsächlich ins Rheintal entwässern. Im südlichen Teil reichen aber die wenig durchlässigen Gesteine der Wildhauser Schuppenzone und der Amdener Schichten auf 1300 m hinauf. Am Frümser-, Saxer- und Gamser-Berg entspringen deshalb nur wenig ergiebige Quellen aus Schutthalden und Moränen mit oberflächlicher Zirkulation und mehrmaligen Quellaustritten bzw. Wiederversickerungen desselben Wassers (HANTKE, KOBEL 1985). Die stauenden Schichten der Wildhauser Schuppenzone erklären auch das dichte Gewässernetz in diesem Bereich. Die Bäche weiter nördlich weisen z.T. ausgesprochenen Wildbachcharakter auf. Sie verlaufen meist in den Drusbergschichten und Valanginian-Mergeln, die einerseits leichter erodierbar sind und andererseits als Stauer eine oberflächliche Entwässerung überhaupt zulassen.

Eine Reihe von Quellen befindet sich in der Gegend von Sennwald. Die auf 670 m gelegene Mühlebachquelle wird vom EW Sennwald gefasst und für die Energieproduktion verwendet. Weiter nördlich treten bei Lienz eine ganze Anzahl kleinerer Quellen aus dem Schuttfächer aus, die auch im Herbst noch Wasser führen. Die oberhalb von Lienz liegenden Nolleregg-Quellen werden vom Schindlerenbach gespeist. Dieser enthält Trockenwetterabfluss aus der von Valanginian-Mergeln abgedichteten Mulde von Roti Platte-Tannmoos und aus durchziehenden Klüften des Hohen Kasten-Gebietes (HANTKE, KOBEL 1985). Die nördlichsten grösseren Karstquellen finden sich bei Rüthi, die bei Hochwasserereignissen sehr stark anschwellen können.

Eine unbekannt Grösse ist der direkte, unterirdische Abfluss von Karstwasser ins Porengrundwasser des Rheintals. Diese Frage ist im Rahmen der umfangreichen Grundwasser-Untersuchungen im Rheintal stellenweise angegangen worden. Quantitative Ergebnisse konnten dabei allerdings nicht er-

zielt werden. Untersuchungen der Hydrochemie und der Grundwasserströmungen ergaben, wie von der Geologie her zu erwarten ist, dass Karstwasser vor allem nördlich Sax bis zum Semelenberg austritt (WEBER et al. 1978:136ff).

6.4 Gebiet Appenzell

Die Entwässerung Richtung Appenzell durch den Schwendebach erfolgt in der Richtung der Faltenachsen. Das Tal liegt in der Blauschnee-Mulde (M Ia, nach HEIM 1905). Der Schwendebach entwässert die Talung des Seealpsees und wird vor allem vom oberflächlichen Abfluss des Seealpsees, den Gätteriquellen, dem Tschuder und den Quellen beim Kieswerk (Nähe Bahnhof Wasserauen) gespeisen. Im Herbst ist das Bachbett oberhalb der Gätteriquellen meist trocken, da das wenige Wasser im Bachbett unterhalb des Seeausflusses bei Reslen versickert. Bei diesen Verhältnissen ist die Quellsituation erst klar erkennbar, da die Austritte z.T. im Bachbett liegen. Der Tschuder ist eine durch die Lage sehr auffällige Quelle. Kurz nach dem Austritt stürzt das Wasser als Wasserfall rund 30 m in die Tiefe. Bereits BAECHLER (1932:73ff) stellte Ueberlegungen zum Mechanismus und zur Herkunft des Wassers an. Grössere Wassermengen schütten auch die Quellen im Kieswerk. Andere Quellaustritte sind quantitativ unbedeutend.

Der Brüelbach weiter östlich in der nächsten Talung dagegen durchschneidet im Brüeltobel das Alp-Sigel-Gewölbe (G III). Der Brüelbach wird durch eine Reihe von Quellen im Brüeltobel gespeisen. Die Austritte liegen sowohl auf der orographisch linken wie der rechten Seite des Tobels. Die Pfannenstielquelle am Tobelausgang unterhalb der Strasse ist für die Trinkwasserversorgung des Bezirkes Rüte gefasst.

7. UNTERSUCHUNG DER BERGSEEN

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Resultate der Untersuchungen von Th. Reutimann wiedergegeben und im Hinblick auf die vorliegenden Fragestellungen gewertet. Für Einzelheiten kann auf REUTIMANN (1987) verwiesen werden.

7.1. Topographie, Geomorphologie und Hydrographie

Die Gestalt des Fälensees in Form eines Troges ist verblüffend einfach. Die Ufer fallen steil ab (Böschungswinkel 30-45 Grad) und laufen in einem flachen Becken mit einer maximalen Tiefe von 25.2 m bei Niedrigwasserstand aus (Abb. 7.2). Normalerweise ist am Fälensee kein oberirdischer Zufluss sichtbar, nach starken Niederschlagsereignissen werden einige Quellen aktiv.

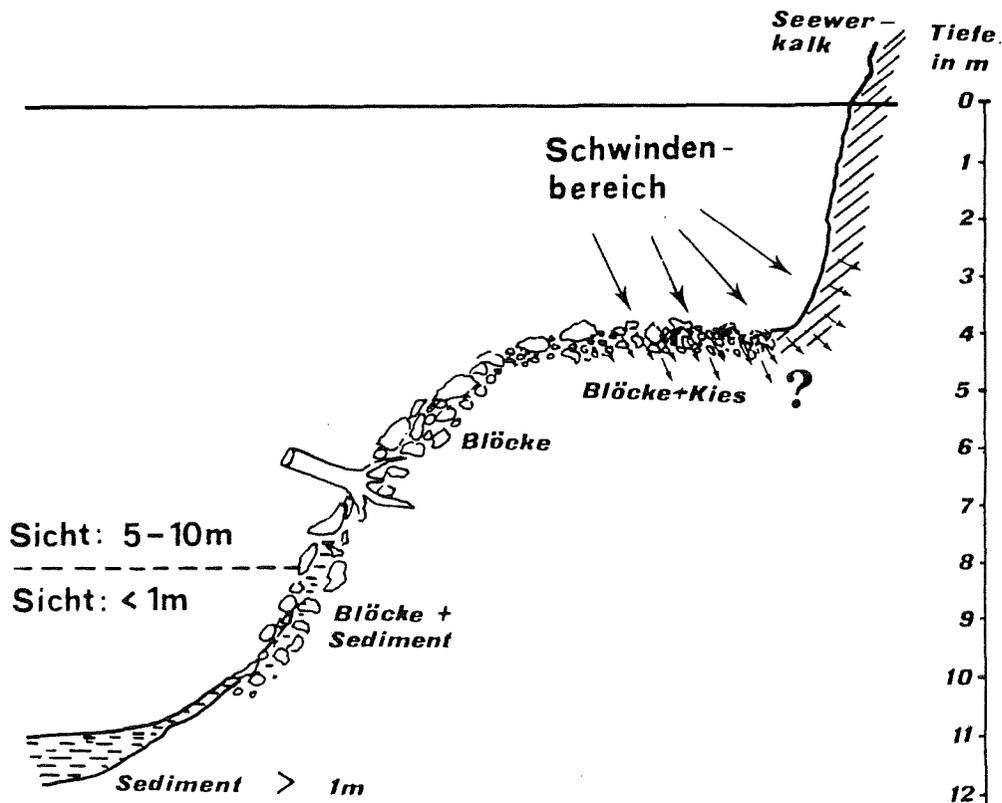
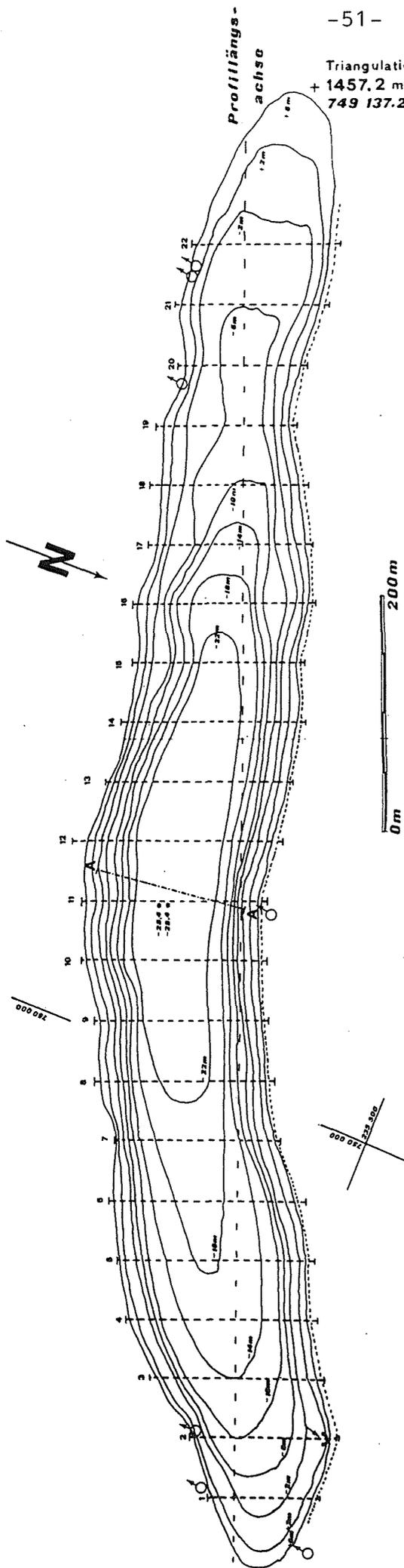


Abb. 7.1: Struktur des Fälenseebodens bei der Schwinde

Trichter, die auf Quellen oder zusätzliche Schwinden hindeuten wurden keine gefunden. Für die Erfassung der Boden-

Triangulationspunkt 347
+ 1457,2 müM
749 137.2/235 127.7



LEGENDE

- 1449.11 müM Pegelnullpunkt
- 4 m Äquidistanz
- 8 m Lotungsprofil
- A Tauchgangsprofil
- Weg
- 25.4 m tiefste Stellen
- Schwinde
- episodisch auftretende Quellen

ISOBATHENKARTE FÄLENSEE
 VERMESSUNG UND KARTENGRUNDLAGE FISCHER 1986
 Abb. 7.2: REUTIMANN 1987

struktur wurden die Resultate der Untersuchungen einer Messonde, deren Eindringtiefe in den Untergrund gemessen wurde, und die Ergebnisse von Kartierungen während Tauchgängen kombiniert. Abbildung 7.1 zeigt die Struktur des Seebodens in der Umgebung der Schwinde. In der Bodenstrukturkarte (Abb. 7.3) ist die Grenze zwischen Sturzmaterial und Sedimentbedeckung deutlich sichtbar. Nur in einem Uferbereich (Mitte nördliches Seeufer) tritt der anstehende Fels unter Wasser hervor. Bezeichnenderweise liegt die Schwinde im Niveau des Schrattenkalkes. Die über Wasser deutlich sichtbare Kluft wirkt als Verluststelle bei Hochwasser. In der Fortsetzung der Kluft Richtung Seemitte verliert der See auf einer Fläche von 5 mal 5 m² Wasser durch den schotterbedeckten Seeboden ans Karstwassersystem.

In Zusammenarbeit mit GSTEIGER, WELTI (1986) wurde der Seealpsee mit einem Echolot vermessen. Aus 25 Echolotprofilen und einigen Punktlotungen im seichten Uferbereich wurde eine Isobathenkarte erstellt. Die tiefste Stelle liegt bei 15.2 m (Seespiegel auf Niveau Ueberlauf). Der See zeigt eine Steilwand im Nordostteil als Fortsetzung der über Wasser liegenden Seewerkalkkrippe, steile Ufer, ein flaches, zentrales Seebecken und eine trichterförmige Vertiefung im Nordwesten als charakteristische Merkmale. Für die Bestimmung des Seegrundes und die Erfassung von unterirdischen Zu- und Abflüssen wurde der See auf einigen interessanten Echolotprofilen abgetaucht. Die unter Wasser kartierten morphologischen Strukturen wurden an die Oberfläche signalisiert und vom Boot aus eingemessen. Die erhaltenen Typprofile wurden den Echolotprofilen zugeordnet und zu einer Karte verarbeitet (Abb. 7.4). Die verschiedenen geomorphologischen Strukturen und Substratbereiche sind aus dieser Karte ersichtlich.

Als weiteres wichtiges Ergebnis kann die Lokalisation von unterirdischen Zu- und Abflüssen bezeichnet werden. Durch die Möglichkeiten der Unterwasserkartierung konnten diese hydrologischen Phänomene direkt in situ erfasst werden. In Abbildung 7.4 ist am Westende des Seealpsees ein Trichter erkennbar. Aufgrund des klaren Wassers und der leicht tieferen Temperatur muss es sich um einen Quelltrichter von diffusen Wasseraustritten handeln. Daneben sind noch zahlreiche andere unter der Wasseroberfläche gelegene Quellen kartiert worden. Die seit längerem bekannten Wasserverluste im Bereich des felsigen Nordufers konnten erstmals lokalisiert werden. Es handelt sich dabei um eine Schwinde in etwa 10 m Wassertiefe. Abbildung 7.5

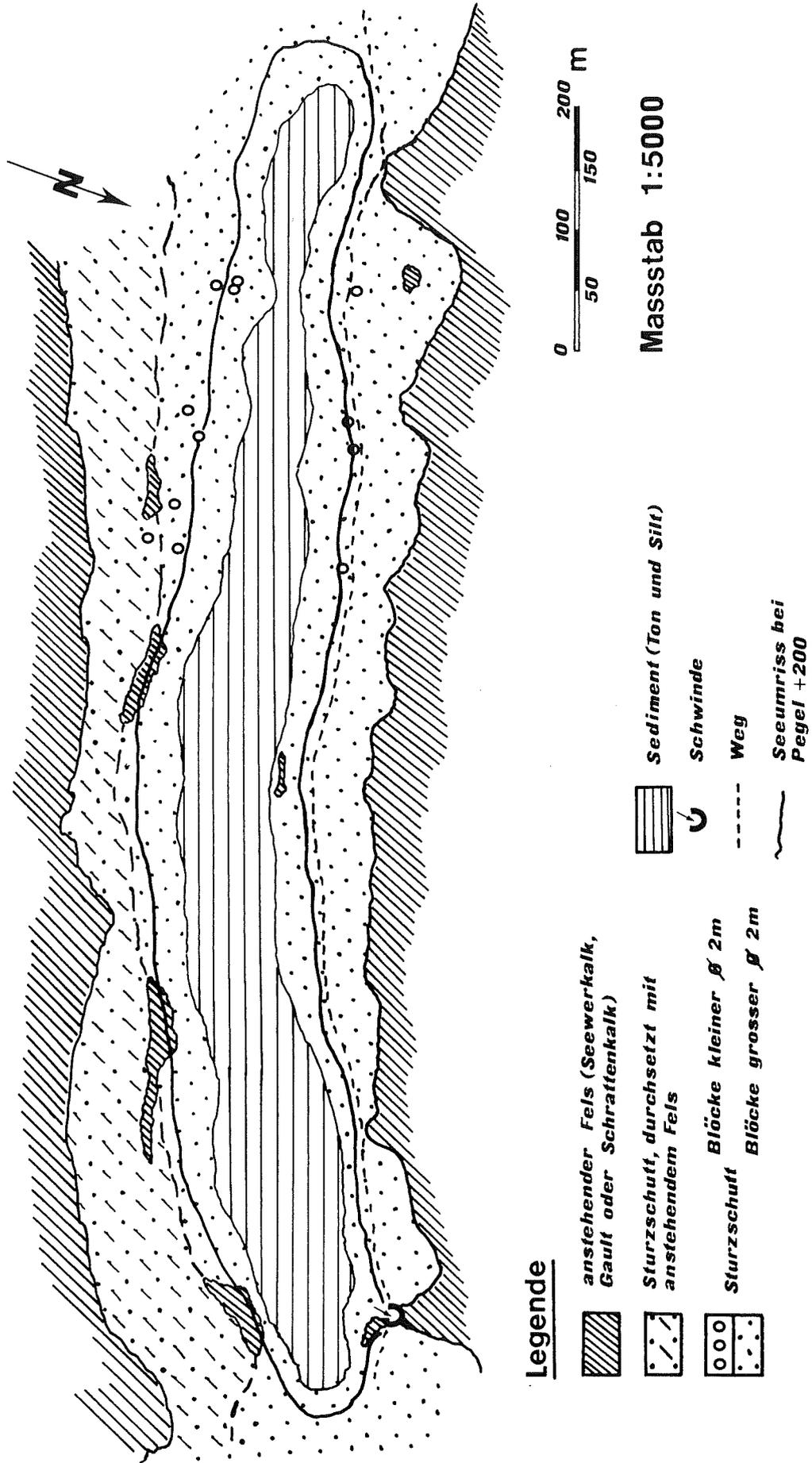
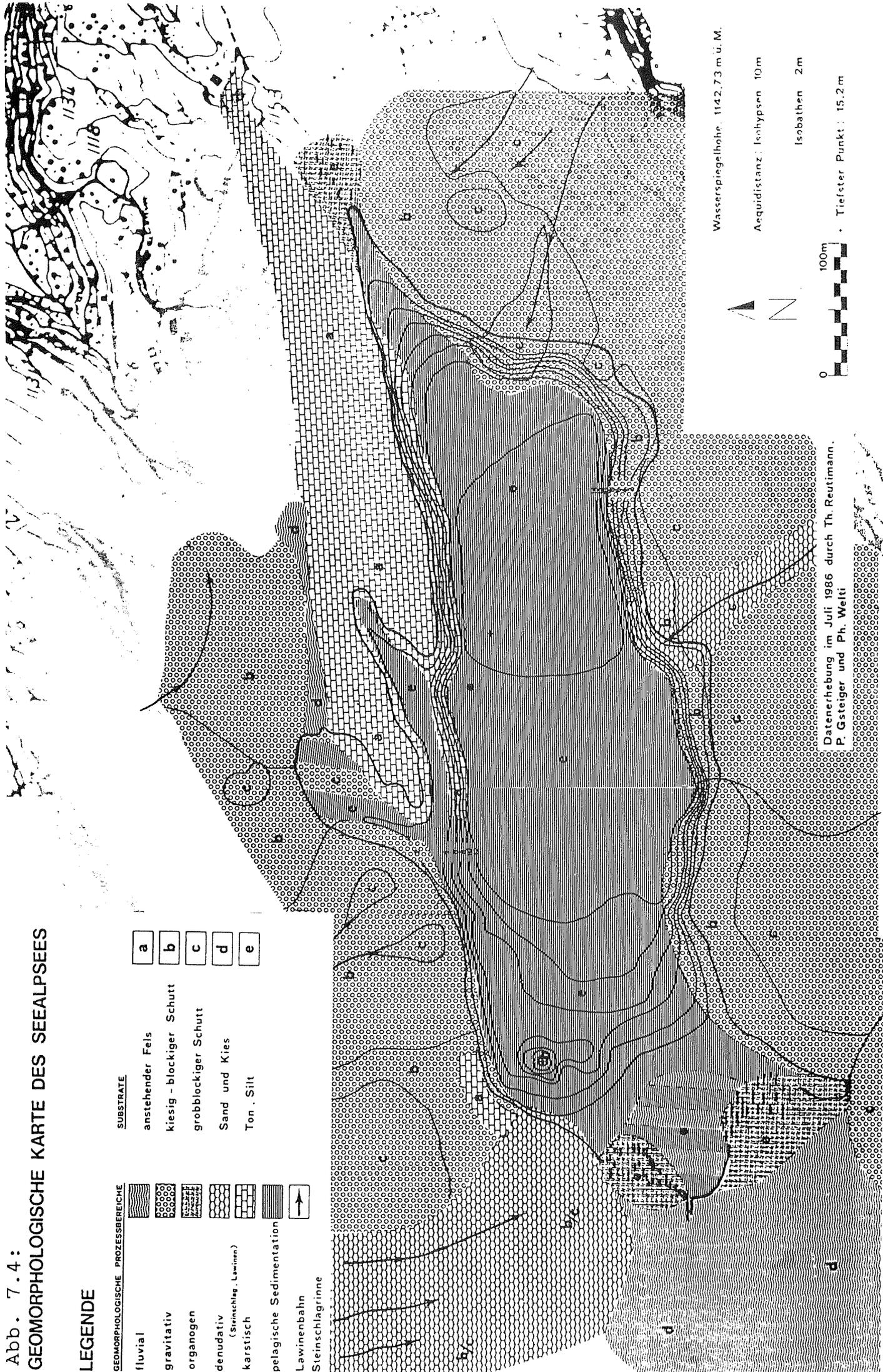


Abb. 7.3: Bodenstruktur des Fäälensees
(aus REUTIMANN 1987:37)

Abb. 7.4:
GEOMORPHOLOGISCHE KARTE DES SEEALPSEES

LEGENDE

GEOMORPHOLOGISCHE PROZESSBEREICHE		SUBSTRATE	
fluvial		a	anstehender Fels
gravitativ		b	kiesig - blockiger Schutt
organogen		c	grobblockiger Schutt
denudativ (Steinschlag, Lawinen)		d	Sand und Kies
karstisch		e	Ton, Silt
pelagische Sedimentation			
Lawinenbahn			
Steinschlagrinne			



Datenerhebung im Juli 1986 durch Th. Reutimann,
P. Gsteiger und Ph. Welti

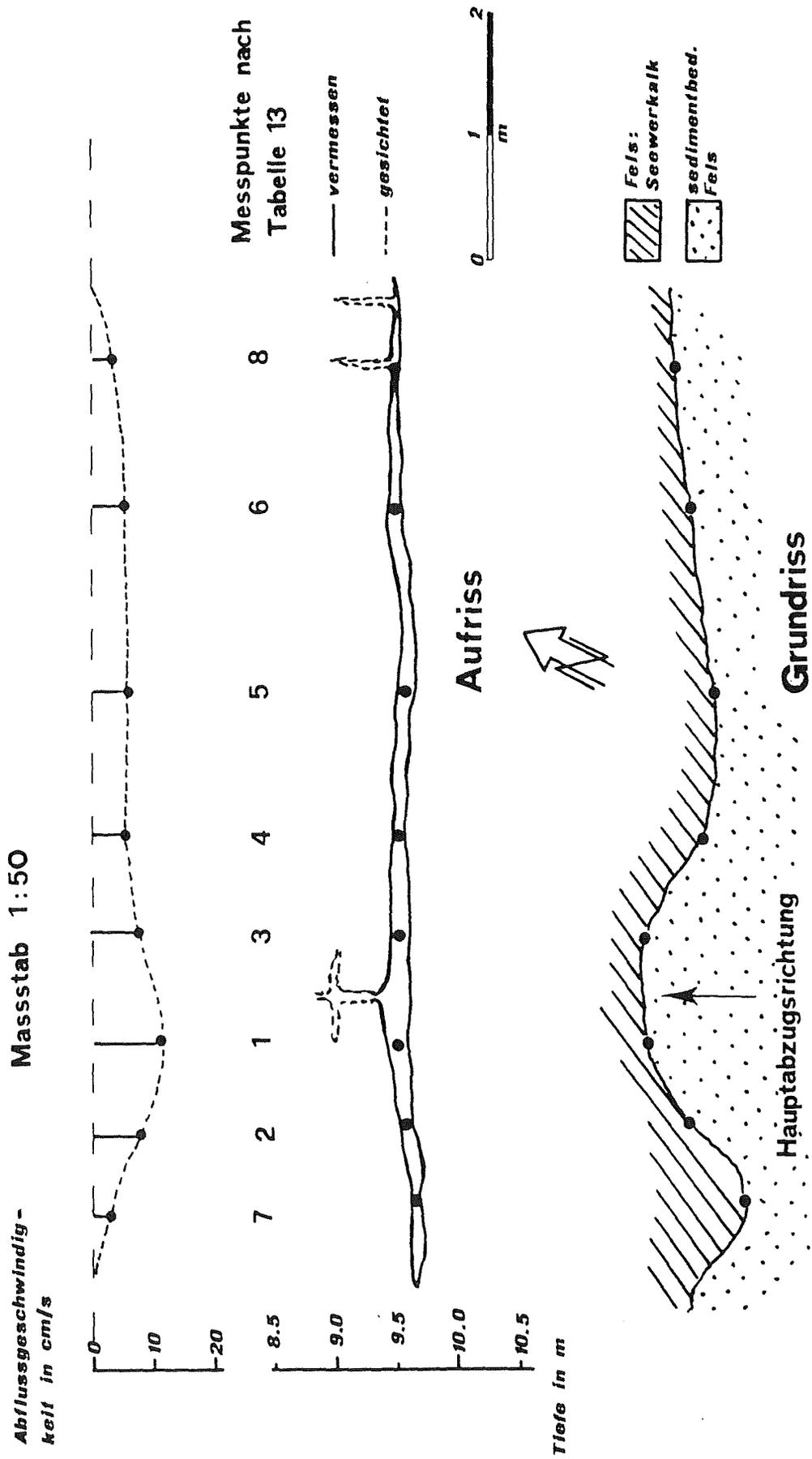


Abb. 7.5: Schwinde im Seealpsee (aus REUTIMANN 1987:50)

zeigt ein Profil durch diese Schwinde bei der Kapelle. Eine Messung des Wasserverlustes mit der vom Taucher eingesetzten Flügelmethode ergab eine Abflussmenge von 70 - 100 l/s.

7.2. Hydrologie

Tabelle 7.1 zeigt die wichtigsten Kennwerte der Seen.

Tab. 7.1: Morphometrische und hydrologische Kennwerte der Alpsteinseen (aus REUTIMANN 1987:52)

	Faelensee	Seealpsee
Pegelschwankungen	-200 bis +600 cm	vernachlaessigbar
Meereshoehe des Nullpegels	1449.1	1142.8
Laenge L in km	1.100-1.250	0.800
Oberflaeche O in km ²	0.115-0.157	0.136
mittlere Breite = O/L in km	0.105-0.125	0.170
Umfang U	2.375-2.668	2.439
Volumen V in Mio m ³	1.394-2.498	1.129
groesste Tiefe T in m	23.4-31.4	15.2
mittlere Tiefe = V/D in m	12.1-15.9 m	8.26
Umfangsentwicklung	1.98-1.90	1.86
Durchflutungsgrad in Tagen*	85	23

Beim Faelensee gelten die zwei Werte fuer die Seepegelstaende -200 und +600 cm, welche fuer Niedrigwasser im Winter und fuer Hochwasser im Sommer erreicht werden.

* Ueberschlagsmaessige Berechnungen auf Grund des topographischen Einzugsgebietes und den abgeschätzten Zu- und Abflussverhältnissen ergeben ähnliche Werte.

Beim Seealpsee wurde am 14./15.5.1986 eine Bilanzierung durchgeführt. Mit der folgenden Gleichung wurde versucht den unterirdischen Zufluss zu erfassen:

$$Z_U + Z_O + A_U + A_O + N - V + S = 0$$

wobei : Z_U = unterirdischer Zufluss
 Z_O = oberirdischer Zufluss
 A_U = unterirdischer Abfluss
 A_O = oberirdischer Abfluss
 N = Niederschlag
 V = Verdunstung
 S = Spiegelveränderung

Die einzelnen Parameter betragen:

oberirdischer Zufluss

Seealpbach	14.5.86	15.30 Uhr	115 l/s
	15.5.86	10.45 Uhr	21 l/s
	Durchschnitt		66 l/s

Quelle	14.5.86	16.00 Uhr	90 l/s
Spitzigstein	15.5.86	11.30 Uhr	75 l/s
	Durchschnitt		82 l/s

Quelle Kalter Brunnen zusammen 22 l/s

unterirdischer Abfluss:

Turbinendurchfluss Durchschnitt	277 l/s
Abfluss Schwinde	70 l/s

oberirdischer Abfluss:

Seealpbach	14.5.86	15.00 Uhr	1436 l/s
beim Wehr	15.5.86	10.00 Uhr	1199 l/s
	Durchschnitt		1317 l/s

Niederschlag:

kein Regen	0 l/s
------------	-------

Verdunstung:

Annahme: 2 mm/d	4 l/s
-----------------	-------

Pegeländerung:

18 mm Absenkung zwischen den Messungen	34 l/s
--	--------

Daraus ergibt sich ein unterirdischer Zufluss von 1464 l/s, also ungefähr $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Momentanwert liegt deutlich über dem Mittelwert, da Mitte Mai auf Grund der

Schneesmelze die Abflussmengen recht hoch sind. Der Jahresmittelwert kann grob auf Grund der Werte der Abflussmessstationen abgeschätzt werden, er dürfte zwischen 0,4 und 0,8 m³/s liegen.

Die durch das Fehlen von oberirdischen Abflüssen stark variierenden Pegelstände von Sämtiser- und Fälensee wurden in den Jahren 1978/79, 1985 und 1986 in regelmässigen Abständen gemessen (Messungen M. Fischer). Dabei wurden an beiden Seen Pegelmarken fix installiert und die Abstiche gemessen. Beim Fälensee ist das Pegelnulld als Bezugsniveau für die Vermessung einnivelliert. Wie Abbildung 7.6 zeigt, verläuft die Kurve des Seespiegels beim Sämtisersee wellenförmig mit Maxima nach der Schneesmelze im Sommer und nach Niederschlagsperioden im Herbst. Das Minimum im Winter ist in etwa jedes Jahr gleich, da sich der See zu diesem Zeitpunkt fast völlig entleert hat. Wenn wir die gleiche Kote des Ueberlaufes wie ARBENZ (1923) annehmen, so ergibt sich bei einem Pegel von etwa -500 cm eine vermutete Ueberlaufkante von 1203.5 m ü.M.. Nach starken Niederschlägen kann der See stark ansteigen. Innert 35 Stunden wurde ein Anstieg von 0.5 m gemessen. Die Jahresamplitude erreichte rund 8,5 m, 1910 betrug sie 14 m (ARBENZ 1923).

Die Schwankungen des Fälensees sind in Abbildung 7.7 graphisch dargestellt. Die Niveauänderungen folgen den gleichen Gesetzmässigkeiten wie beim Sämtisersee. Nach starken Niederschlägen stieg der Seespiegel innert 20 Stunden um 93 cm. Der Niedrigwasserstand muss durch eine Ueberlaufkante gegeben sein, denn der Wasserstand sinkt nie unter -280 cm. Regelmässige Messungen im Winter 1979 bestätigten dies.

Die Seespiegelschwankungen beim Seealpsee waren schon vor dem Aufstau im Jahr 1905 kleiner, da der Seealpsee über einen ausgleichenden oberirdischen Abfluss verfügt. Aufzeichnungen aus dem letzten Jahrhundert belegen Seespiegelamplituden von 3,5 m im Jahr (aus: Technische Betriebe Appenzell 1912). Heute liegt der Absenkungsbetrag im Winterhalbjahr bei 2 bis 3 m.

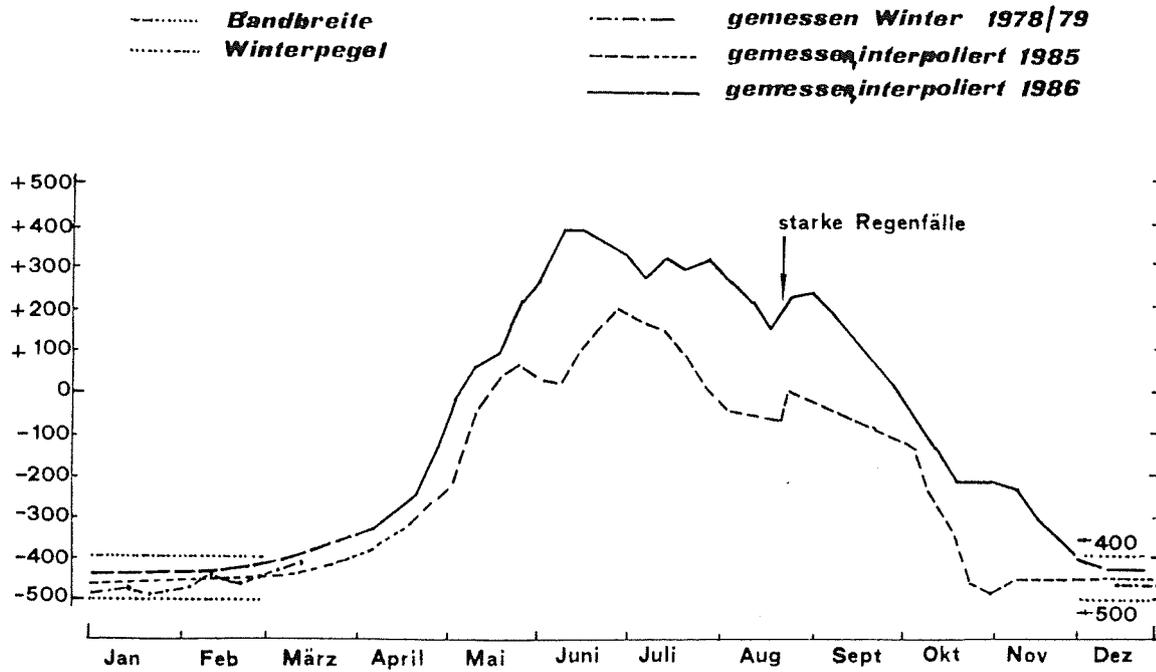


Abb. 7.6: Seespiegelschwankungen des Sämtisersees (aus REUTIMANN 1987:76)

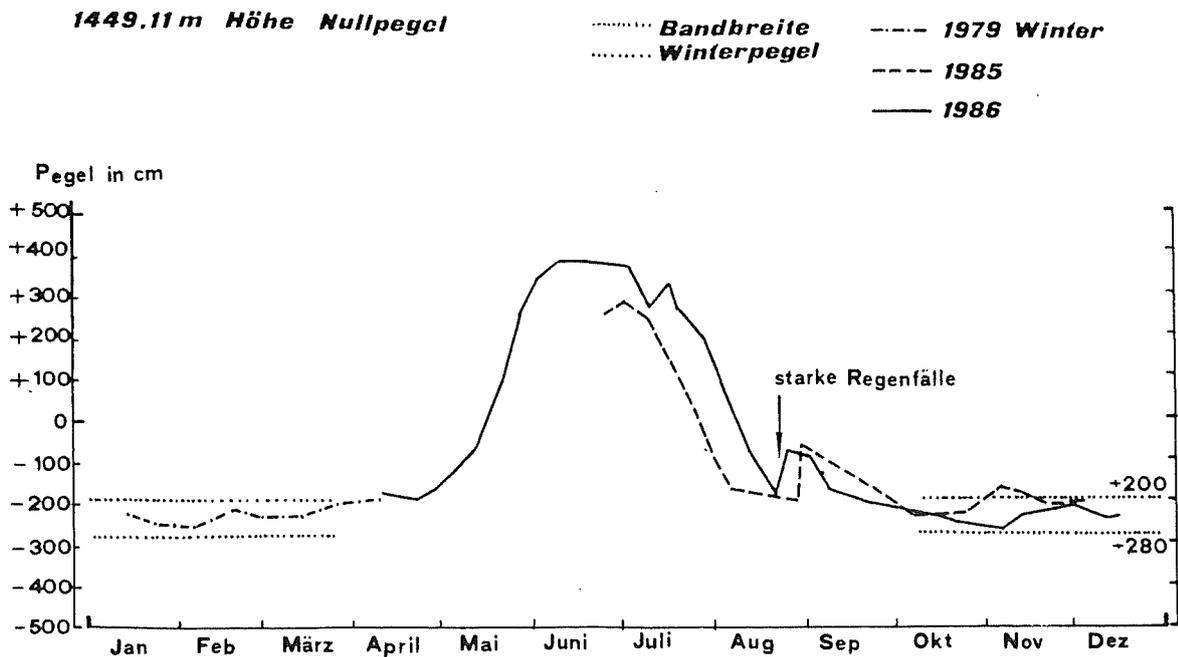


Abb. 7.7: Seespiegelschwankungen des Fälensees (aus REUTIMANN 1987:77)

7.3. Thermik

Wie die Abbildung 7.8 zeigt, weist der Fälensee die für einen dimiktischen See charakteristischen Strukturen auf. Seiner Dreiteilung im Spätsommer in Oberflächen-, Sprung- und Tiefenschicht (Epi-, Meta-, Hypolimnion) steht die zweiteilige Schichtung der Wassermassen des Seealpsees in Meta- und Hypolimnion gegenüber. Man sieht deutlich das Fehlen des homothermen Epilimnions. Der Fälensee erwärmt

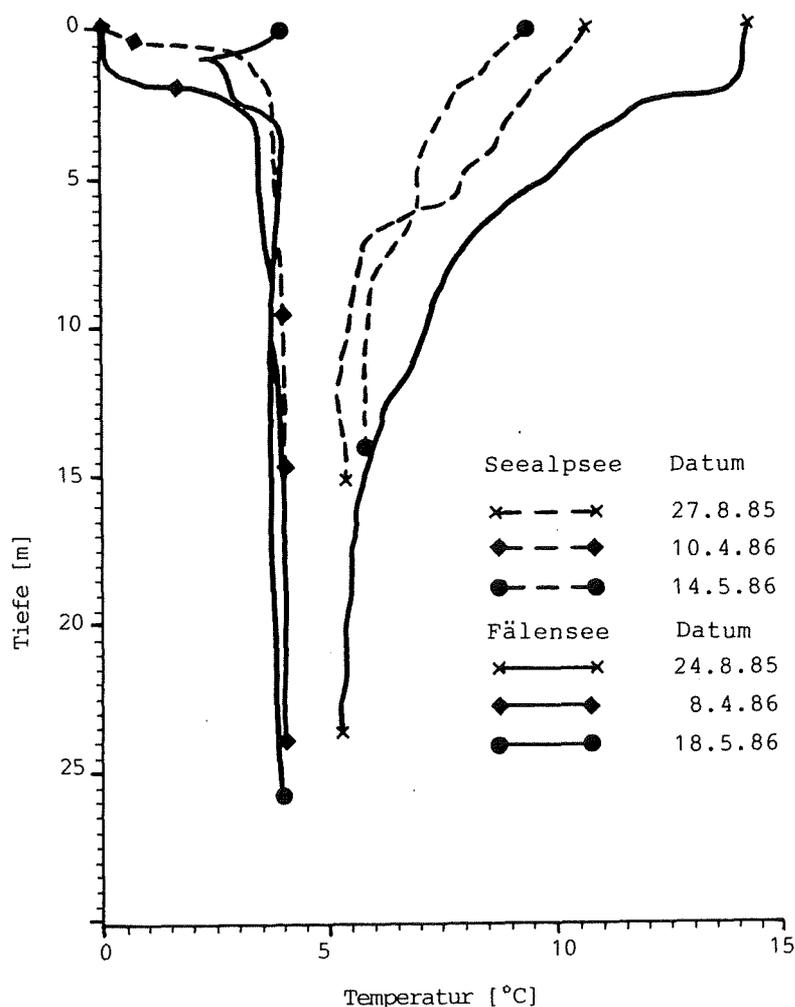


Abb. 7.8: Temperaturstruktur von Fälen- und Seealpsee (nach REUTIMANN 1987:92)

sich viel schneller, obwohl er längere Zeit eisbedeckt ist. Die um 300 m höhere Lage, die durch nahe Höhenzüge abgedeckte Einstrahlung und die grössere Tiefe lassen eigentlich eine geringere Erwärmung als im Seealpsee vermu-

ten. Da die Windverhältnisse in den beiden Längstälern etwa gleich sind, muss die unterschiedliche Aufwärmung auf einen höheren Durchflutungsgrad des Seealpsees zurückgeführt werden. Die oben beschriebenen für den Seealpsee günstigeren Erwärmungsfaktoren können den vergleichsweise grösseren Wärmeverlust durch den Zufluss von kaltem Wasser und den Abfluss von warmem Seewasser nicht kompensieren.

Im weiteren sind bei beiden Seen die Winterstagnationen mit der charakteristischen Inversion der Wassertemperaturen ersichtlich, d.h. das Oberflächenwasser ist kälter als das Tiefenwasser. Diese Schichtung beruht auf der Dichteanomalie des Wassers, das bei 4 Grad C die grösste Dichte erreicht. Im Hochsommer erreicht der Fälensee in Ufernähe Temperaturen von gegen 20 Grad C, während sie im Seealpsee nie über 15 Grad steigt. Das Tiefenwasser des Fälens- und des Seealpsees ist meist etwa gleich warm.

Interessant ist, dass im erwähnten Trichter im Nordwesten des Seealpsees das Tiefenwasser bei allen Messungen 0.2 bis 0.3 Grad C kälter ist als das in gleicher Tiefe liegende Wasser des zentralen Seebeckens.

Das Wasser des Säntisersees ist im Sommer wegen der geringen Tiefe meist bis knapp über Grund homotherm, also gleich warm. Im Winter bildet sich ebenfalls eine Temperaturinversion aus, wobei aber die Differenzen gegen die Oberfläche nicht sehr ausgeprägt sind. Im Hochsommer werden angenehme Badetemperaturen von über 20 Grad C erreicht.

7.4. Wasserbeschaffenheit

Eine Klassierung der Seen nach Wasserinhaltsstoffen ist der ähnlichen Werte wegen nicht möglich. Bei allen Wässern handelt es sich um "Ca-HCO₃"- Wasser, also um calciumhydrogenkarbonat-reiches Wasser. Eine Erklärung für die leicht höheren Härtewerte des Tiefenwassers beim Seealpsee und Fälensee kann nebst dem Zufluss von kaltem und härterem Wasser die geringere Löslichkeit von CO₂ in warmem Wasser und die biogene Entkalkung in den obersten Schichten sein.

Die Konzentrationen der Werte Chlorid, Sulfat, Nitrat und Nitrit sind in den drei Alpsteinseen gering. In Einzelbeprobungen wurden zusätzlich für den Fälens- und

Seealpsee Ammoniak/Ammonium und Phosphat analysiert. Die Ammoniak/Ammoniumwerte betragen für Fälensee 0.08 mg/l, Seealpsee Oberfläche 0.27 mg/l, Seealpsee Trichter 0.01 mg/l. Die entsprechenden Werte beim Orthophosphat lagen bei 0.24, 0.05, 0.29 mg/l.

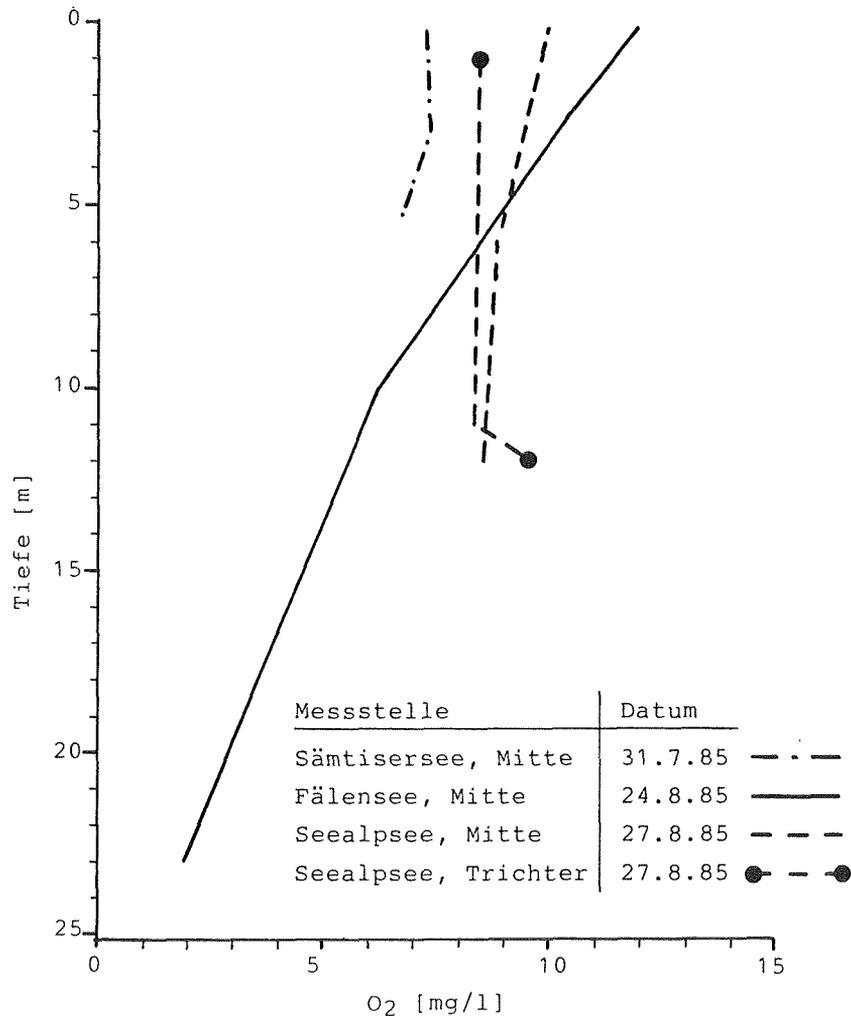


Abb. 7.9: Sauerstoffwerte (nach REUTIMANN 1987:105)

Diese Werte zeigen, dass die Nutzung einen Einfluss auf die Gewässer hat. Mit den Resultaten von nur je einer Analyse kann aber keine qualitative Beurteilung oder Klassierung der Belastung vorgenommen werden. Diesen Werten steht der geringe Gehalt von Chlorid (Zivilisationsindikator) und Nitrat (Indikator für Einflüsse der Landwirtschaft) gegenüber. Diese beiden Parameter wurden bei 34 Proben gemessen. Sie deuten auf eine geringe Belastung durch Nutzung hin.

Untersucht wurde auch der Sauerstoffgehalt des Seewassers. Der Sauerstoffgehalt des Säntisersees ist, wie wegen seiner geringen Tiefe zu erwarten war, in allen Tiefen aufgrund der guten Durchmischung konstant und nahe der Sättigung. Anders verhält es sich beim Fälensee. Er weist in seinen vertikalen Sauerstoffprofilen grosse Differenzen auf. Am Grund wird der Sauerstoff fast restlos aufgezehrt, was bei der schlammigen Bodenschicht nicht erstaunt. Parallel zu seiner stabilen thermischen Schichtung im Sommer bilden sich Sauerstoffdifferenzen zwischen den Schichten aus. Da ausser an der Oberfläche keine Werte für das Winterhalbjahr erhoben wurden, kann über die Verteilung nach der Vollzirkulation im Herbst nichts ausgesagt werden.

Wie bereits ausgeführt, ist der Seealpsee besser durchflutet als der Fälensee. Deshalb sind die Unterschiede in den verschiedenen Tiefenschichten im Sauerstoffgehalt wegen der grösseren Durchmischung kleiner als beim Fälensee. Besonders während der höchsten Assimilationsrate der Algen im Hochsommer, wenn in anderen Seen die stabile Schichtung einen Sauerstofftransport vom Epilimnion ins Hypolimnion verhindert, wirkt beim Seealpsee die Durchmischung fast bis zum Grund. Im Bereiche des Trichters (zufließendes Wasser) wurden höhere Sauerstoffkonzentrationen als im übrigen Tiefenwasser gemessen.

7.5. Hydrologische Bedeutung und Probleme der Alpsteinseen

Die Bergseen bildeten einen wichtigen Teil der Untersuchungen und waren teilweise überhaupt Anlass zu diesen Arbeiten. Sie sind auch die auffallendsten hydrologischen Elemente des Alpsteins. Sie tragen viel zur reizvollen Gebirgslandschaft bei, die heute die Grundlage für einen regen Wandertourismus bildet.

Zu Beginn konnte wegen den teilweise unbekanntem Zu- und Abflussverhältnissen in keiner Weise beurteilt werden, ob die Seen überhaupt eine wichtige Funktion in der Entwässerung übernehmen. Denkbar ist ja auch, dass diese Seen ohne hydrologisch bedeutende Speicherfunktion dem Karstwassersystem aufsitzen. Trotz der schwierigen Erfassung der Zu- und Abflussverhältnisse gelang es eine Uebersicht über die mittleren Durchflussmengen zu erhalten. Beim Säntiser- und Fälensee beruhen diese Werte auf Abschätzungen aufgrund der Seespiegelschwankungen. Beim Seealpsee konnten die Zu-

und Abflüsse zum Teil direkt gemessen werden. Aus diesen Berechnungen ergab sich für Fälen- und Sämtisersee ein mittlerer Jahresabfluss und -zufluss von 300 bzw. 200 l/s und beim Seealpsee von 600 l/s.

Der Seealpsee weist also einen bedeutend höheren Wasserdurchsatz auf als die beiden anderen Seen. Dieser Sachverhalt lässt sich auch durch die thermischen Untersuchungen bestätigen. Aus der gesamten Seedurchflussmenge von 1 m³/s kann anhand der Abflussspende ein Einzugsgebiet von 18-20 km² ermittelt werden. Daraus ergibt sich eine recht grosse Bedeutung der Seen im Entwässerungssystem des Alpsteins. Vor allem der Sämtiser- und der Fälensee üben auch eine gewisse Speicherfunktion aus, die sich in den grossen Spiegelschwankungen recht eindrücklich manifestiert. Dagegen sind die Spiegelschwankungen des Seealpsees wegen dem oberirdischen Abfluss recht gering. Lediglich die Nutzung durch das Kraftwerk führt zu einer gewissen Winterabsenkung.

Die Untersuchungen des Seegrundes zeigten, dass die Wasserverluststellen punktuell lokalisierbar sind, wenn auch im Rahmen dieser Untersuchungen nicht eine flächendeckende Erhebung möglich war, da taucherische Kartierungen sehr aufwendig sind. Der Seeboden ist durch Sedimente der Ton- und Siltfraktion gut abgedichtet, womit höchstens geringe Sickerverluste zu erwarten sind. Die eigentlichen Wasserverluststellen sind in den steil abfallenden Uferpartien zu suchen. Im Seealpsee konnte auch ein bedeutender unterirdischer Zufluss nachgewiesen und an einer Stelle lokalisiert werden.

Die Untersuchungsergebnisse über die Durchflutung, die Messung des Sauerstoffgehaltes und zeitweise auch der aesthetische Aspekt (Algenwuchs, Abwasserfahne) zeigen problematische Gesichtspunkte beim Fälensee. Die mechanisch-biologisch geklärten Abwässer des Berggasthauses Bollenwees werden am Ostende in den See eingeleitet. Die eingeleitete Wassermenge hat sich nach dem Ausbau des Gasthauses noch erhöht. Dies führt zu einem recht bedeutenden Nährstoffeintrag insbesondere im Sommer und Herbst bei relativ geringer Durchflutung, stabiler Schichtung, hoher Einstrahlung und Wassertemperatur. Hier ist mittelfristig eine andere Lösung prüfenswert. Das geforderte Qualitätsziel für stehende Gewässer, dass der Sauerstoffgehalt zu keiner Zeit und in keiner Tiefe weniger als 4 mg O₂/l betragen soll (Verordnung über Abwassereinleitungen, Art. 2 Absatz 6), kann unter den heutigen Bedingungen nicht eingehalten

werden. Zu überprüfen sind die Ausbringung oder Versickerung der geklärten Abwässer (vgl. Kap. 12.5.4). Eine Lösung dieses Problems könnte auch der Attraktivität des Sees (z.B. auch als Badegewässer) und damit dem Tourismus förderlich sein.

8. ABFLUSS

Der Abfluss ist das einzige Wasserhaushaltselement, das im Rahmen der Untersuchungen im Alpstein kontinuierlich gemessen wurde. Eine Wasserhaushaltsbilanz kann für das nach allen Seiten hin offene Untersuchungsgebiet ohnehin nicht aufgestellt werden. Die Abflusswerte liefern wertvolle Informationen, bezüglich Einzugsgebietsgrösse, Speicherverhalten und Einzugsgebietshöhe. Die dazu verwendeten Kenngrössen und Auswerteverfahren sowie die Resultate werden in diesem Kapitel beschrieben.

8.1. Jahresgang des Abflusses

Nach der Gliederung von ASCHWANDEN, WEINGARTNER (1985) können die gemessenen Gewässer des Alpsteins dem 'régime nival de transition' im Uebergang zum 'régime nival alpin' zugeordnet werden. Der Abfluss wird vor allem durch die Schneeschmelze in den Monaten April bis Juli geprägt.

In den Abbildungen 8.1 und 8.2 ist der dimensionslose Quotient aus 15-tägigen Mittelwerten und mittlerem Jahresabfluss aufgetragen. Diese Darstellung erlaubt einen direkten Vergleich der Jahresganglinien der dargestellten Stationen. Die Ermittlung von 15-tägigen Mittelwerten ergibt eine bessere Differenzierung als die sonst üblichen Monatswerte. Trotz zwischenliegendem Speicher zeigen die Messresultate, dass die Quellschüttungen etwa gleichzeitig mit den Oberflächengewässern ansprechen. Der Speicher führt allenfalls zu einem verzögerten Auslauf.

Bei allen Stationen tritt deutlich das Maximum der Schneeschmelze im Frühjahr und Frühsommer heraus. Im Herbst folgen weitere Maxima im Zusammenhang mit Niederschlagsperioden. Die Ganglinien der Quellen (Tschuder, Dorfbach, Mülibach) unterscheiden sich nicht grundsätzlich von den Oberflächengewässern. Der Speicher bewirkt eine Dämpfung, der hohe Schmelzwasserzufluss wird aber zumindest hydraulisch direkt wirksam. Eine detaillierte Betrachtung des Verlaufs der Schneeschmelze gibt Hinweise auf die Höhenlage des Einzugsgebietes.

Die Schneeschmelze setzt im allgemeinen mit zunehmender Höhe später ein. Ein detaillierter Vergleich der Abflussregimes unter gleichen hydrologischen Bedingungen sollte

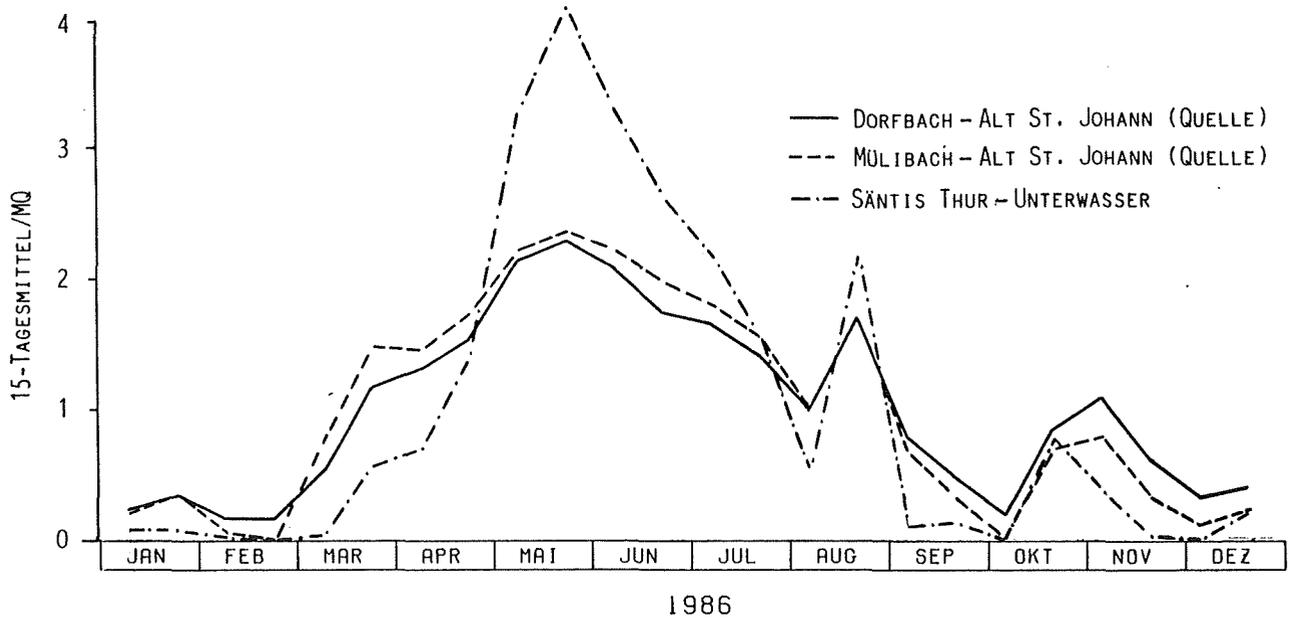
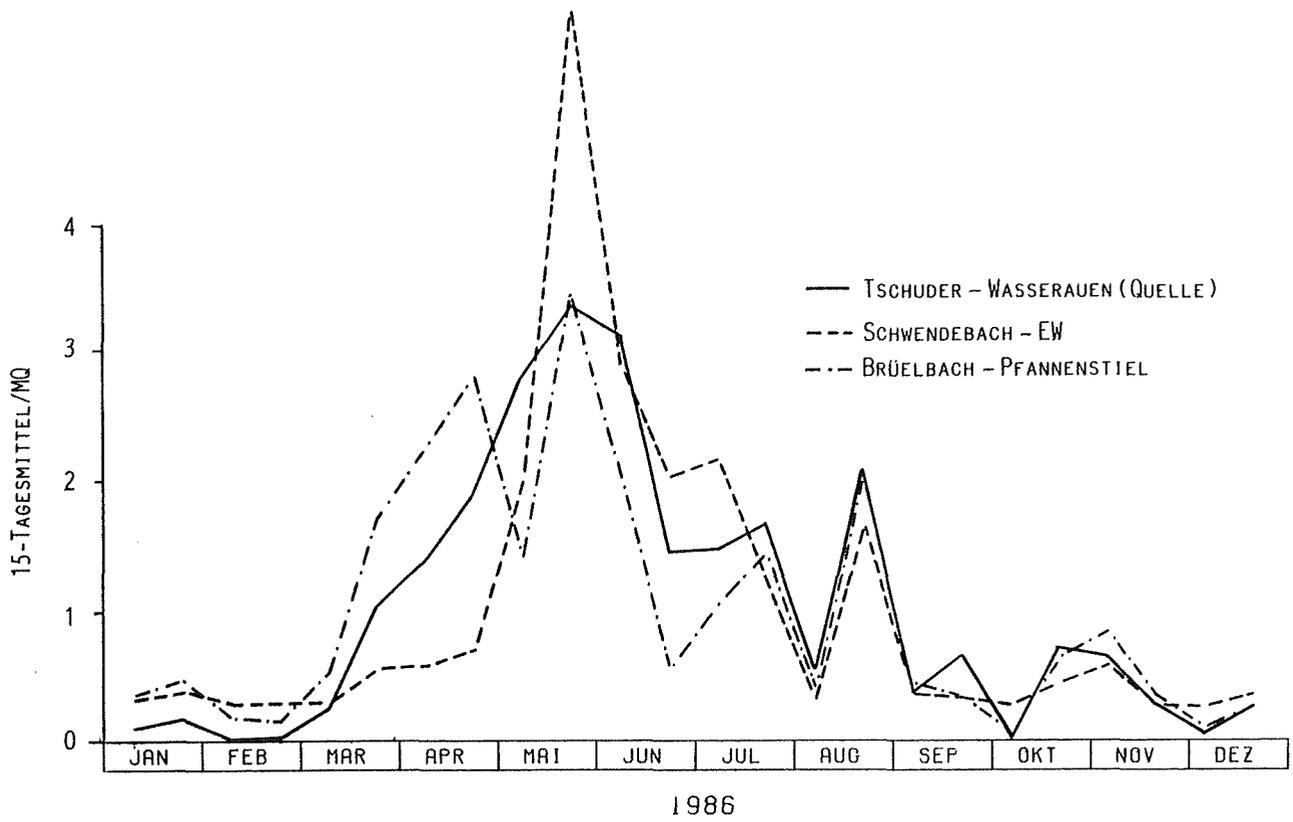


Abb. 8.1:
Abflussregimes im Alpstein (15-Tagesmittel) 1986

deshalb Vergleiche der Einzugsgebietshöhen zulassen. Der Schmelzabfluss aus der Schneedecke wird von zwei Grössen bestimmt:

- verfügbare Schneemenge
- zugeführte Schmelzwärme

Die Schneemenge ergibt sich aus der Niederschlagsmenge und der Schneeverfrachtung des Winters.

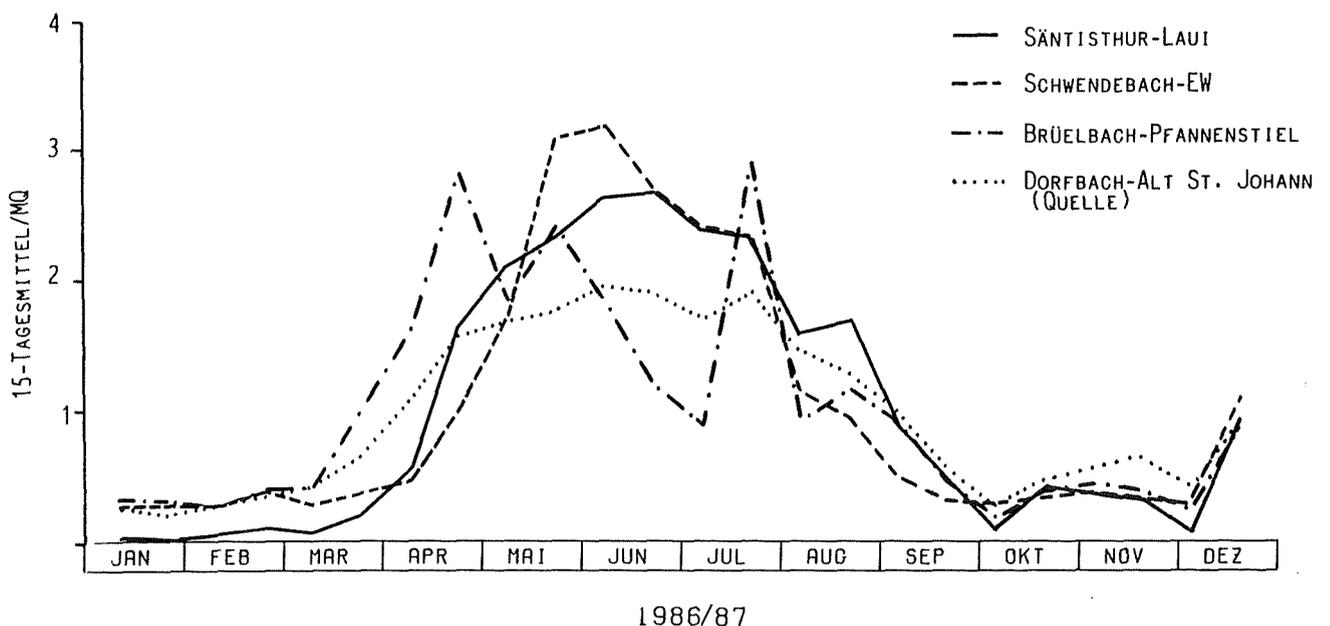


Abb. 8.2: Abflussregimes im Alpstein (15-Tagesmittel) 1986/87

Für die Schmelzwärme darf im regionalen Rahmen des Alpsteins und für die Dimension einzelner Einzugsgebiete angenommen werden, dass sie vor allem von der Höhe abhängig ist. Eine gewisse Differenzierung ergibt sich allenfalls durch die unterschiedliche generelle Exposition der Einzugsgebiete bei der Strahlungsbilanz. Die Verteilung der Schneemenge kann für die Dimension der Einzugsgebiete als homogen betrachtet werden, auch wenn kleinräumig mit sehr grossen Schneeverfrachtungen zu rechnen ist. Schneeschmelzmodelle voralpiner Gebiete, welche gute Resultate liefern, arbeiten nur mit klimatischen Parametern, die räumlich wenig differenziert sind (BRAUN 1985) und im Rahmen des Alpsteins v.a. höhenabhängig sind. Aus dem Ver-

gleich der Abflussganglinien darf deshalb auf die relative Höhe der Einzugsgebiete zueinander geschlossen werden.

Der Verlauf der Station Schwendebach-EW kann nicht in diesem Sinne interpretiert werden, da das Auffüllen des Seealpsees, der als Speicher des Kraftwerkes dient, eine Verfälschung bewirkt.

Gemeinsam setzt die Schneeschmelze beim Brüelbach und den Quellen in Alt St. Johann (Dorfbach, Mülibach) und auch bei der Quelle Tschuder-Wasserauen ein. Bei der Sämtisthur erfolgt der Beginn später. Beim Brüelbach ist die Schneeschmelze bereits sehr früh abgeschlossen, was auf eine relativ geringe mittlere Einzugsgebietshöhe hinweist. Die Quellen in Alt St. Johann führen noch länger relativ viel Wasser. Sie besitzen offensichtlich auch Anteil an höher gelegenen Einzugsgebieten (vgl. Kap. 12), wie auch die Sämtisthur, wo das aus dem Gewässerverlauf ersichtlich ist. Der frühe steile Abfall der Tschuderquelle deutet auf einen kleinen Anteil an höherem Einzugsgebiet hin. Aus diesen Ueberlegungen kann folgende Rangfolge der mittleren Einzugsgebietshöhen postuliert werden:

Brüelbach < Tschuder, Quellen in Alt St. Johann < Sämtisthur

8.2. Ermittlung der Einzugsgebietsgrösse

8.2.1 Vorgehen

Für die Bestimmung der Fläche wurde ein Verfahren verwendet, das auf den gemessenen Abflussmengen und geschätzten mittleren Abflussspenden beruht. Die Einzugsgebietsfläche ergibt sich aus dem Quotienten von Jahresabfluss und Abflussspende. Die Abflussspende ist für Einzeljahre nicht oder nur ungenau bestimmbar. Die Berechnung erfolgt deshalb auf Grund langjähriger mittlerer Werte. Für die gemessenen Jahresabflüsse erfolgt an Hand repräsentativer Stationen mit langjährigen Messreihen (Tab. 8.1) eine Korrektur auf einen Periodenwert.

Tab. 8.1: Daten längerer Abflussmessreihen im Alpstein

	Thur- Stein m ³ /s	Sitter- Appenzell m ³ /s	Urnäsch- Hundwil m ³ /s	Thur- Klostobel m ³ /s	Säntisthur- Unterwasser m ³ /s
1981	4.84	4.15	3.13	1.76	1.25
1982	4.23	3.87	2.92	1.44	0.99
1983	3.69	3.06	2.55	1.22	0.82
1984	3.90	3.26	2.62	1.17	
1985	3.40	3.14	2.48	1.02	0.72
1986	3.38			1.08	0.71
Periode	1964-85 4.10	1964-85 3.648	1962-85 2.88		
		1923-85 3.54			

Es gibt verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Abfluss-
spende. Die Bestimmung über die Lösung der Wasserbilanz-
gleichung ($A=N-V\pm S$) ist beim Untersuchungsgebiet und der
angewandten Untersuchungsmethodik nicht möglich. Die Un-
tersuchungen von ASCHWANDEN (1985:89) zeigten, dass diese
Methode sowieso nur wenig befriedigende Resultate liefert,
da die Gebietsverdunstung nicht zuverlässig ermittelt wer-
den kann. ASCHWANDEN (1985:87ff) hat im Rahmen seiner Un-
tersuchungen verschiedene Verfahren geprüft und ent-
wickelt. Er schlägt zwei vor:

1. Uebertragung der Abflussspende einer flussabwärts lie-
genden Messstation unter Einbezug der Niederschlags-
und Höhenverhältnisse.
2. Anwendung von regional gültigen Regressionsbeziehungen,
die auf klimatischen und physiographischen Ein-
flussgrössen beruhen.

Das erste Verfahren kann im vorliegenden Fall nicht ange-
wendet werden, da auf Grund der ebenfalls nicht bestimmbar-
en Fläche des übergeordneten Einzugsgebietes für dieses
keine Abflussspende ermittelt werden kann. Es ist deshalb
die Formel angewendet worden, die in Abbildung 8.3 aufge-
führt ist. Diese Abbildung gibt einen Ueberblick des ange-
wendeten Bestimmungsverfahrens, dessen einzelne Teil-
schritte im folgenden erläutert sind.

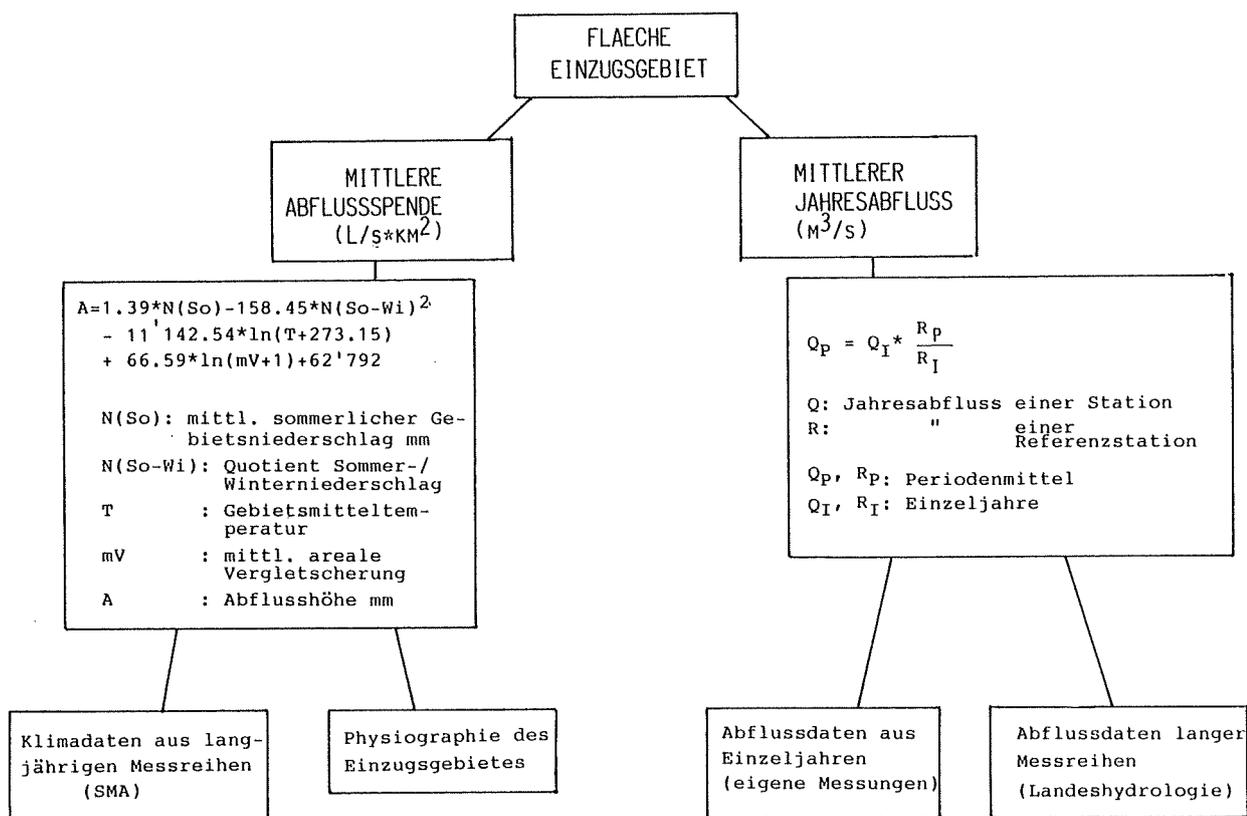


Abb. 8.3: Verfahren zur Bestimmung der Einzugsgebietsflächen

8.2.2 Langjähriger mittlerer Abfluss

Die Ermittlung zuverlässiger Mittelwerte der Jahresabflüsse erfordert lange Messreihen. Nach ASCHWANDEN (1985:51) ergibt sich für die Regimetypen im Alpstein (nival alpin und nival de transition) für eine Genauigkeit von $\pm 10\%$ in der Bestimmung des Mittelwertes eine notwendige Beobachtungsdauer von 14 Jahren. Bereits für eine Genauigkeit von $\pm 20\%$ ist eine 4-jährige Messreihe nötig. Für die Ermittlung eines Abflussmittels ist deshalb der Bezug langjähriger Messreihen unumgänglich. Da regionale Unterschiede der Einzeljahre nicht auszuschliessen sind, werden dabei mit Vorzug nahe liegende Stationen mit ähnlichem Regime verwendet. Aus diesen Erwägungen kommen drei Stationen der Landeshydrologie in Frage: Thur-Stein, Sitter-Appenzell, Urnäsch-Hundwil.

Die Daten dieser Stationen sind in Tabelle 8.1 zusammengestellt. Aus den oben angeführten Ueberlegungen zur erforderlichen Messreihe geht hervor, dass der Bestimmungsfehler für die Stationen Thur-Stein und Urnäsch-Hundwil noch relativ gross ist. Der Station Sitter-Appenzell mit der Periode 1923-85 kommt deshalb erste Priorität zu.

Für die Uebertragung muss auch der Variationskoeffizient der mittleren Jahresabflüsse berücksichtigt werden. Die Untersuchungen von ASCHWANDEN (1985, unpubl.) zeigen, dass die Variationskoeffizienten der Einzeljahre aller untersuchten Stationen in diesem Regimetyp nahe bei 20% liegen. Es wird daher eine gleich grosse prozentuale Abweichung sämtlicher Stationen vom langjährigen Mittelwert angenommen.

Für alle Stationen ausser der Quelle Tschuder-Wasserauen liegt eine zweijährige Messreihe vor. Nach dem oben erläuterten Verfahren liegen so zwei Schätzwerte für das Periodenmittel (Q_p) vor. Für die weiteren Berechnungen wird das Mittel der beiden Werte verwendet. Die so bestimmten Werte der mittleren Abflüsse einer langen Periode sind in Tabelle 8.3 zusammengestellt. Aktuelle Daten der Bezugsstationen lagen nur für die Thur-Stein bis Oktober 1987 vor. Als Bezugsgrösse werden daher die hydrologischen Jahre 1985/86 und 1986/87 verwendet.

8.2.3 Mittlere Abflusssspende

Für die Bestimmung der Abflusssspende wird die Regressionsbeziehung von ASCHWANDEN (1985:113) verwendet:

$$A = 1.39 * n(So) - 158.45 * N(So - Wi)^2 - 11142.54 * \ln(T + 273.15) + 66.59 * \ln(mV + 1) + 62792$$

wobei $N(So)$: mittl. sommerlicher Gebietsniederschlag mm (April-Sept.)
 $N(So - Wi)$: Quotient Sommer-/ Winterniederschlag
 T : Gebietsmitteltemperatur
 mV : mittl. areale Vergletscherung
 A : Abflusshöhe mm

Sie liefert als Resultat die Abflusshöhe in mm, die in die Abflusssspende umgerechnet werden kann.

Es sind folgende Niederschlagsstationen verwendet worden:

Station	m ü.M
Saxerriet	437
Appenzell	791
Urnäsch	840
Starkenbach	891
Brülisau	925

Station	m ü.M
Wildhaus	1050
Schwägalp	1337
Kronberg	1625
Säntis	2500

Zur Berechnung stehen die Mittelwerte der Periode 1931-70 zur Verfügung, z.T. Werte der Periode 1969-82, die aber eine geringe Abweichung zeigen.

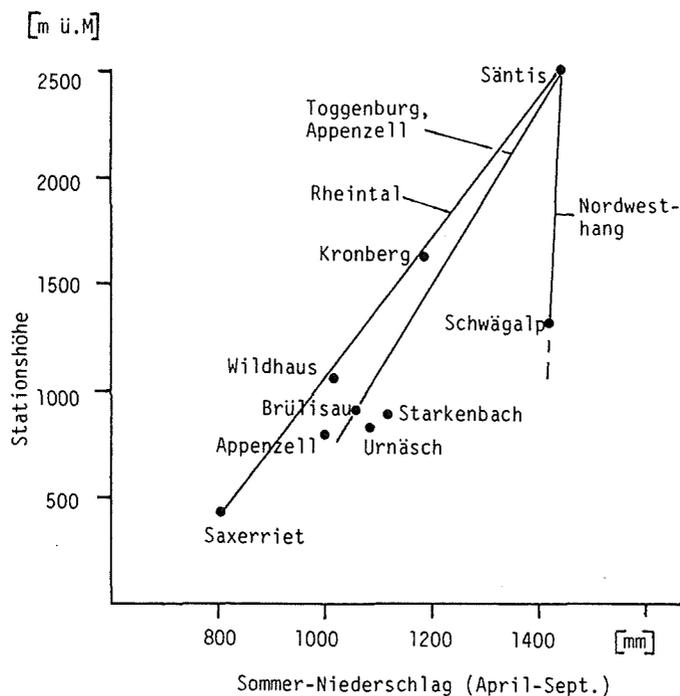


Abb. 8.4: Sommer-Niederschlag und Stationshöhe

In die Formel zur Bestimmung der Abflusssspende geht der Sommerniederschlag (Summe der Monate April bis September) ein, der in Abbildung 8.4 gegen die Stationshöhe aufgetragen ist. Deutlich ist der Luv-Lee Effekt des Alpsteins erkennbar. Für die Bestimmung der Abflusssspende sind deshalb drei Gradienten der Niederschlagszunahme für die verschiedenen Gebiete berücksichtigt worden:

- Nordwesthang (Luv) mit geringer Höhenabhängigkeit und hohen Niederschlagssummen.

- Rheintalhang (Lee) mit relativ geringen Niederschlags-
summen (inkl. östlicher Teil des Toggenburgs)
- "Zentraler" Alpstein, mittlere Werte

Tab. 8.2 : Abflussspenden für verschiedene mittlere
Einzugsgebietshöhen
(nach Formel von ASCHWANDEN 1985:113)

Höhe	T	N(So)	N(So-Wi)	A(mm)	q(l/s*km ²)
Nordwestseite					
1500	3.3	1415	1.3	1847	58.5
2000	0.8	1425	1.3	1963	62.2
2500	-1.9	1440	1.3	2094	66.4
Toggenburg/Appenzell					
1000	5.5	1080	1.5	1205	38.2
1500	3.0	1200	1.5	1472	46.6
2000	0.5	1320	1.4	1786	56.6
2500	-1.9	1440	1.3	2094	66.4
Rheintal					
500	8.5	840	1.7	651	20.6
1000	5.0	1050	1.6	1133	35.9
1500	3.4	1170	1.5	1414	44.8
2000	0.9	1310	1.4	1755	55.6
2500	-1.9	1440	1.3	2094	66.4

Da die Zunahme der einzelnen Gebiete ziemlich linear ist, kann aus Abbildung 8.4 direkt der Gebietsniederschlag für eine gewählte mittlere Einzugsgebietshöhe entnommen werden. Die berechneten Abflusshöhen und Abflussspenden sowie die verwendeten Eingangsgrößen sind in Tabelle 8.2 tabelliert und in Abbildung 8.5 grafisch dargestellt. Auf Grund der Lage der einzelnen Einzugsgebiete kann so eine Abflussspende bestimmt werden.

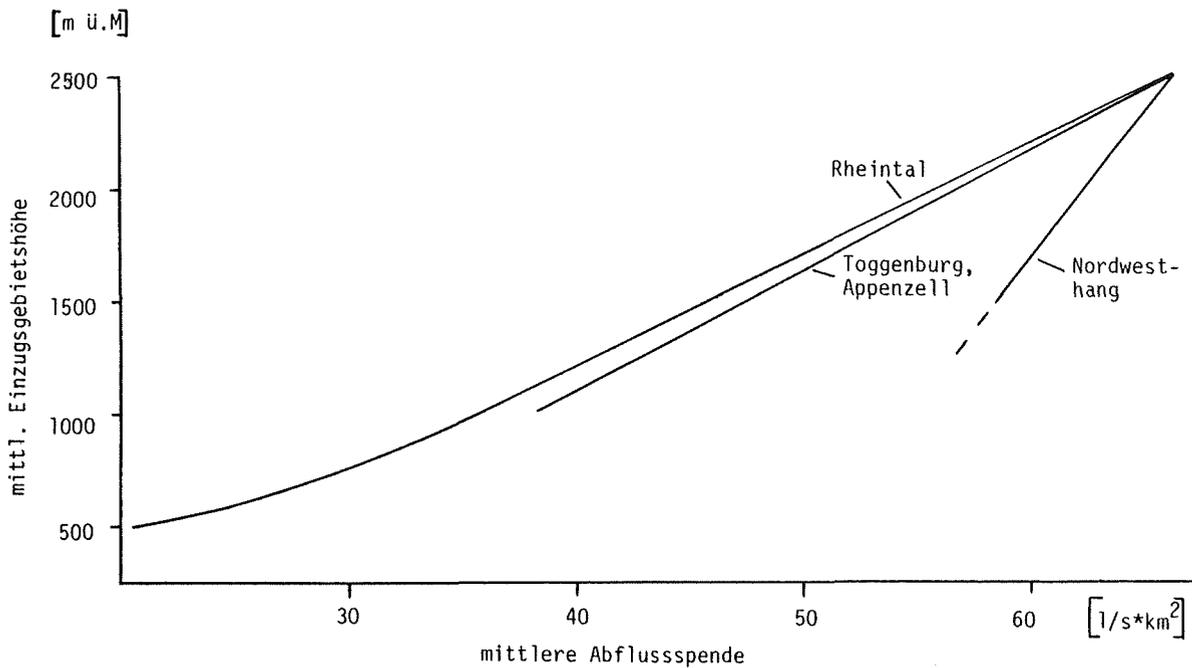


Abb. 8.5: Höhenabhängigkeit der Abflusssspende

8.2.4 Berechnung der Einzugsgebietsfläche

Die Einzugsgebietsfläche entspricht dem Quotienten aus mittlerem Jahresabfluss und Abflusssspende:

$$\text{Einzugsgebietsfläche (km}^2\text{)} = \frac{\text{mittlerer Jahresabfluss (l/s)}}{\text{Abflusssspende (l/s*km}^2\text{)}}$$

wobei Abflusssspende = $f_1(f_2(\text{Einzugsgebietsfläche}), \text{Lage})$

Die Lösung erfordert ein iteratives Vorgehen zur Anpassung, da die Abflusssspende eine Funktion der Einzugsgebietshöhe und der Lage im Alpstein (Luv-Lee Effekt) ist. Die Höhe ist aber wiederum eine Funktion der Fläche; im allgemeinen nimmt mit der Fläche auch die mittlere Höhe zu. Es sind theoretisch mehrere gleich gute Anpassungen denkbar. In die Bestimmung können aber auch andere Kenntnisse (Resultate der Markierversuche, Kenntnisse der Karsthydrographie) eingebracht werden. Die Ermittlung der Einzugsgebietsfläche musste daher zusammen mit der Einzugsgebietsabgrenzung (Kap. 12) vorgenommen werden.

Die bestimmten Einzugsgebietsflächen und die dazu verwendeten Daten der Abflusssspende und des langjährigen mittleren Abflusses sind in Tabelle 8.3 zusammengestellt. Nach ASCHWANDEN (1985:129) kann für die Flächenbestimmung mit einer Genauigkeit von $\pm 10\%$ gerechnet werden.

Tab. 8.3: Mittl. Jahresabflüsse und abgeschätzte Einzugsgebietsflächen

Station	mittl. Jahresabfluss		langjähriges Mittel	mittl. Abfluss-spende	Fläche
	1985/86	1986/87			
	m ³ /s		m ³ /s	l/s*km ²	km ²
Brülbach-Pfannenstiel	0.186	0.229	0.213	43	4.95 ¹
Tschuder-Wasserauen	0.224 ²		0.254	59	4.3 ¹
Schwendebach-Ditzes	0.994	1.24	1.15	58	19.8
Schwendebach-EW +Wasser EW	0.565	0.735	0.664	56	11.9 ¹
Dorfbach-Alt St. Johann	0.308	0.455	0.385	54	7.1 ¹
Mülibach-Alt St. Johann	0.519	0.580	0.556	54	10.2 ¹
Pumpwerk-Alt St. Johann	0.063	0.075	0.071	54	1.3 ¹
Säntisthur-Unterwasser	0.687	0.973	0.841	59	14.3 ¹
Mühlebach-Sennwald	0.5 ²		0.568	48	11.8 ¹
Ablespegel-Alt St. Johann	0.507	0.720	0.622	54	11.5 ¹
Thur-Lau	0.829	1.06	0.965	59	16.3
Summe der Einzugsgebiete					77.3

¹ bei der Summenbildung berücksichtigt
² Daten des Kalenderjahres 1986

Die Fläche der gesamten Säntisdecke des Alpsteingebietes beträgt 135 km², darin sind aber Gebiete enthalten, die

tiefer liegen als die aufgeführten Abflussmessstellen. Die Summe der erfassten Einzugsgebietsflächen zeigt, dass offensichtlich an den Messstellen ein grosser Teil des Abflusses im Alpsteingebiet erfasst worden ist.

Auf Grund dieser Ergebnisse kann auch ein direkter, unterirdischer Abfluss bedeutender Wassermengen ausgeschlossen werden.

Die Resultate unterstreichen die Bedeutung der Entwässerung in Richtung der Faltenachsen (Schwendebach, Sämtisthur). Eine grosse Bedeutung kommt offensichtlich auch den Quellen in Alt St. Johann zu, die in ihrer Summe die Werte der Sämtisthur-Unterwasser übertreffen.

8.3. Speicherverhalten

8.3.1 Dauerkurve

Die Form der Dauerkurve hängt bei gleichen Inputbedingungen, wie sie für das Untersuchungsgebiet einigermaßen gegeben sind, vom Speicherverhalten des Einzugsgebietes ab. In den Abbildungen 8.6 und 8.7 sind die Dauerkurven einiger Stationen aufgetragen. Sie wurden mit dem mittleren Jahresabfluss standardisiert, um einen direkten Vergleich der Stationen zu ermöglichen.

Auffallend ist das geringe Maximum bei jenen Stationen, die reine Quellaustritte erfassen (Abb. 8.7). Bei steigendem Wasserstand fliesst ein Teil des Wassers oberflächlich ab, weil das Karstwassersystem eine beschränkte Durchflusskapazität aufweist. Bei der Gätteri-Wasserauen fliesen die Hochwasserspitzen dem Schwendebach, bei den Quellen in Alt St. Johann der Sämtisthur zu (vgl. Kap. 12). Beim Tschuder fehlt eine solche Möglichkeit für den grössten Teil des Einzugsgebietes. Die besondere Form der Dauerkurve des Tschuders beruht teilweise sicher auf dem Ueberlaufcharakter, sie ist aber für Ueberlaufquellen nicht typisch. Der Mühlebach-Alt St. Johann, auch eine Ueberlaufquelle, weist eine sehr ähnliche Dauerkurve auf wie der Dorfbach-Alt St. Johann.

Die Oberflächengewässer (Abb. 8.6) weisen höhere Maximalwerte und einen steileren Abfall der Dauerkurven auf, da die Durchflusskapazität nicht wie bei den Quellen begrenzt ist, und kein bedeutender Speicher vorhanden ist.

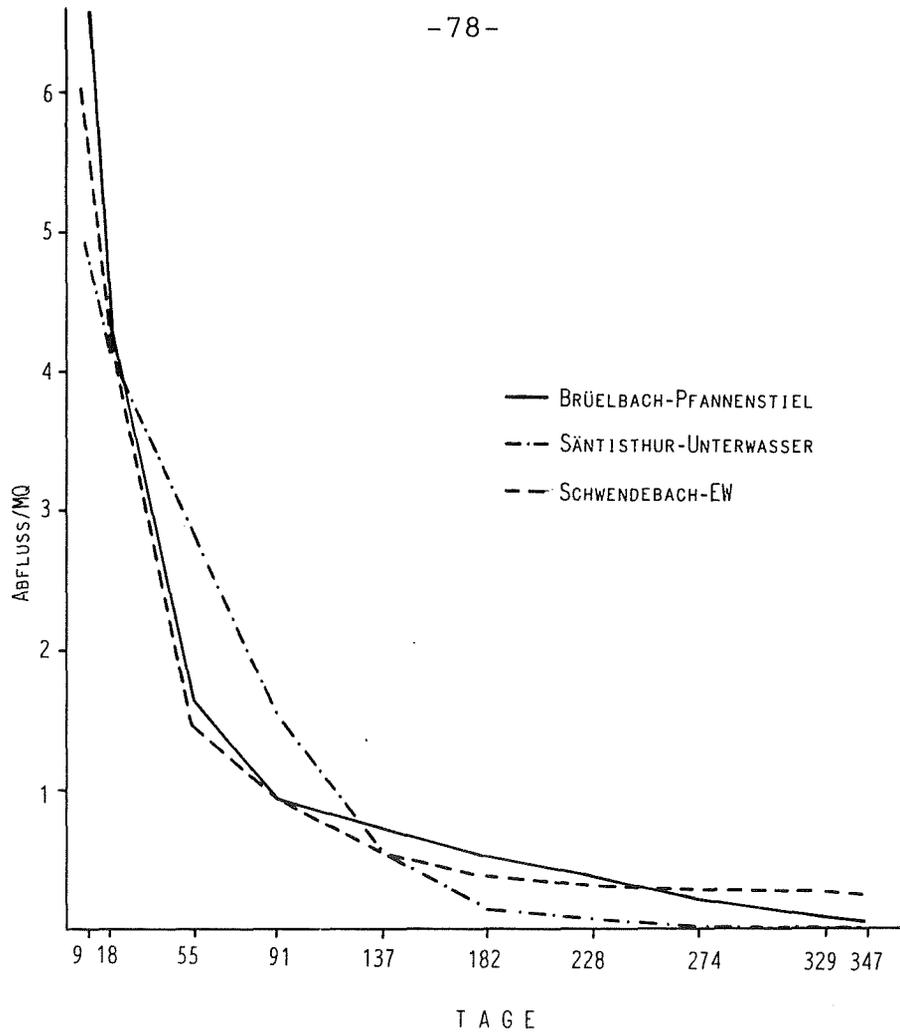


Abb. 8.6: Dauerkurven von Oberflächenflächengewässern 1986 (standardisiert mit mittlerem Jahresabfluss)

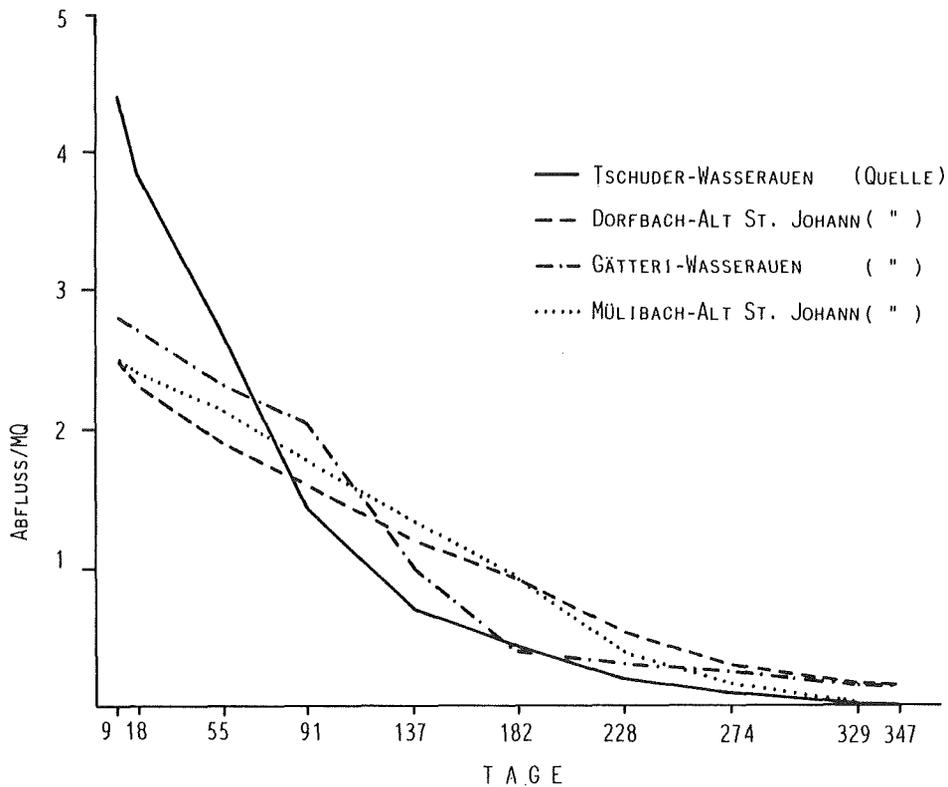


Abb. 8.7: Dauerkurven von Quellen 1986 (standardisiert mit mittlerem Jahresabfluss)

8.3.2 Rezessionsverhalten

Die Abflussrückbildung in niederschlagsfreien Perioden unterliegt meist folgendem einfachen exponentiellen Gesetz:

$$Q(t) = Q(0) * \exp -\alpha t$$

$Q(t)$: Abfluss zur Zeit t

$Q(0)$: Abfluss zur Zeit $t=0$

α : Rezessionskoeffizient

t : Zeit (in Tagen)

Dieser Gesetzmässigkeit gehorcht ein linearer Einzelspeicher. Um bei Abflusskurven eine optimale Anpassung an den Rückgang der Abflussmengen zu erreichen, muss die Kurve meist in zwei bis drei Bereiche mit unterschiedlichen zugehörigen Rezessionskoeffizienten gegliedert werden. Für den obersten Bereich wird hie und da auch folgendes Rezessionsgesetz verwendet (KULLMANN 1982:143):

$$Q(t) = Q(0) * (1 - \beta(t))$$

Oft wird auch folgende Formel verwendet:

$$Q(t) = Q(0) / (1 + \beta(t))^2$$

Diese Abflussrückbildungsgesetze sind hier nicht verwendet worden, da sie theoretisch nicht fundiert sind, und die häufig verwendete MAILLET-Formel eine gute Anpassung erlaubte.

Im Hinblick auf das Karstwassersystem liefert die Analyse des Rezessionsverhaltens folgende Informationen:

- Der Rezessionskoeffizient α charakterisiert das Ausfliessen der Speicher, die den einzelnen Kurvensegmenten entsprechen. Niedere Werte von α treten bei einem langsamen Ausfliessen des Speichers, d.h. bei grossem Rückhaltevermögen des Einzugsgebietes auf. Hohe Werte treten bei raschem Rückgang der Abflussmengen auf.
- Durch Integration der Rezessionskurve lässt sich das ausfliessbare Speichervolumen berechnen:

$$V = \int_{t_0}^{t_1} Q(0) * \exp -\alpha t dt = 1/\alpha Q(0) (\exp -\alpha t_1 - \exp -\alpha t_0)$$

für $t_1 = \infty$ gilt:

$$V = Q(0) / \alpha \quad *86'400$$

V : Ausfliessbares Speichervolumen
Q(0): Abfluss zur Zeit t=0 (m³/s)
t₀ : Zeitpunkt von Q(0)
α : Rezessionskoeffizient (d⁻¹)

Die Rezessionskoeffizienten einer Quelle schwanken in einer gewissen Bandbreite zwischen verschiedenen Ereignissen. Für die Bestimmung muss daher möglichst eine grosse Stichprobe von Kurvensegmenten vorliegen. In den alpinen Verhältnissen des Alpsteins muss bei der Auswahl der Ereignisse berücksichtigt werden, dass in der ersten Jahreshälfte die Abflussmenge zu einem grossen Teil durch die Schneeschmelze bestimmt wird. Da für unsere Fragestellung aber in erster Linie das Speicherverhalten des Karstwassersystems interessant ist, konnten nur Ereignisse ab August bis zum Winterbeginn zur Bestimmung zugezogen werden. In dieser Periode spielt das Schmelzwasser nur eine sehr untergeordnete Rolle.

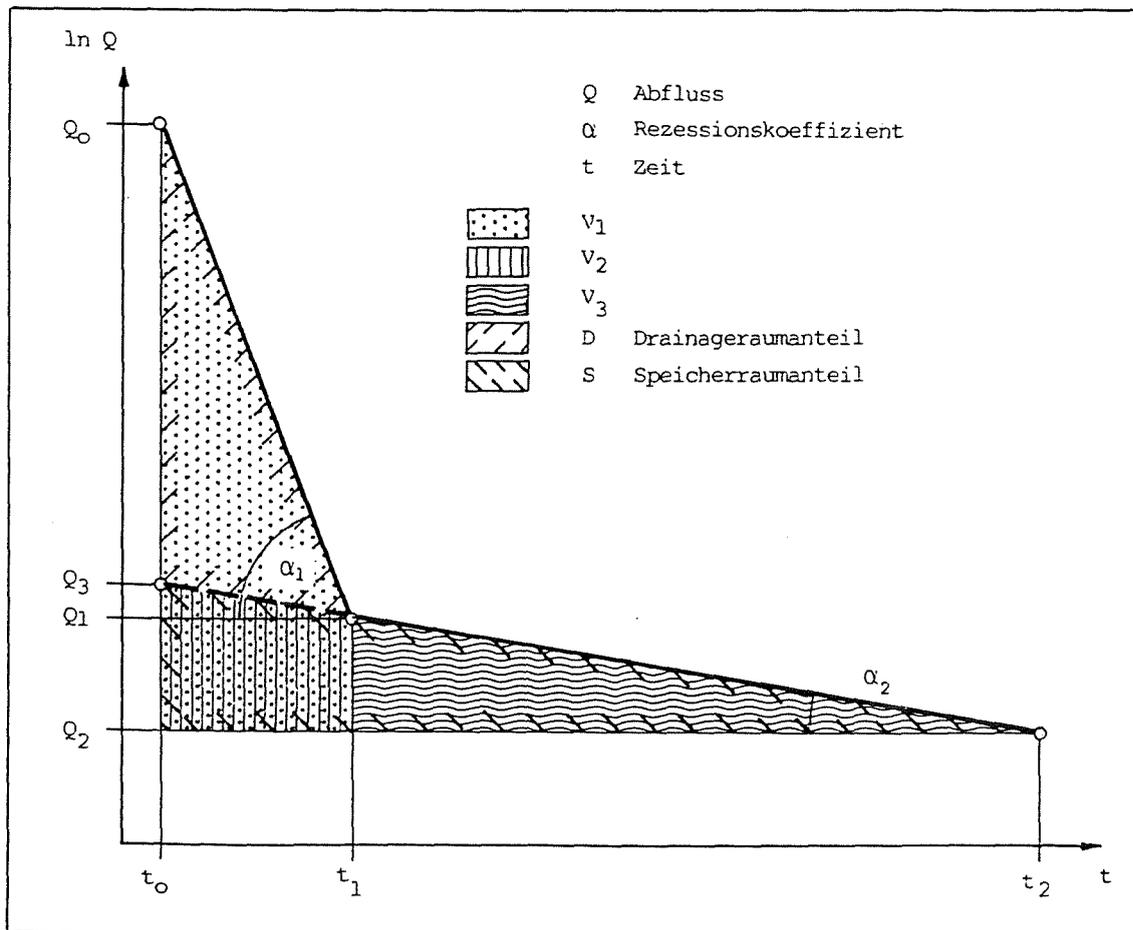


Abb. 8.8: Drainage- und Speicherraumanteil, schematische Darstellung (aus SIRAGUSA 1988)

Die bei den untersuchten Abflussmessstationen ermittelten Werte sind in Tabelle 8.4 zusammengestellt. Abbildung 8.8 erläutert die Bedeutung der aufgeführten Werte. In Abbildung 8.9 sind als Beispiel die untersuchten Auslaufereignisse für die Station Schwendebach-EW aufgezeichnet.

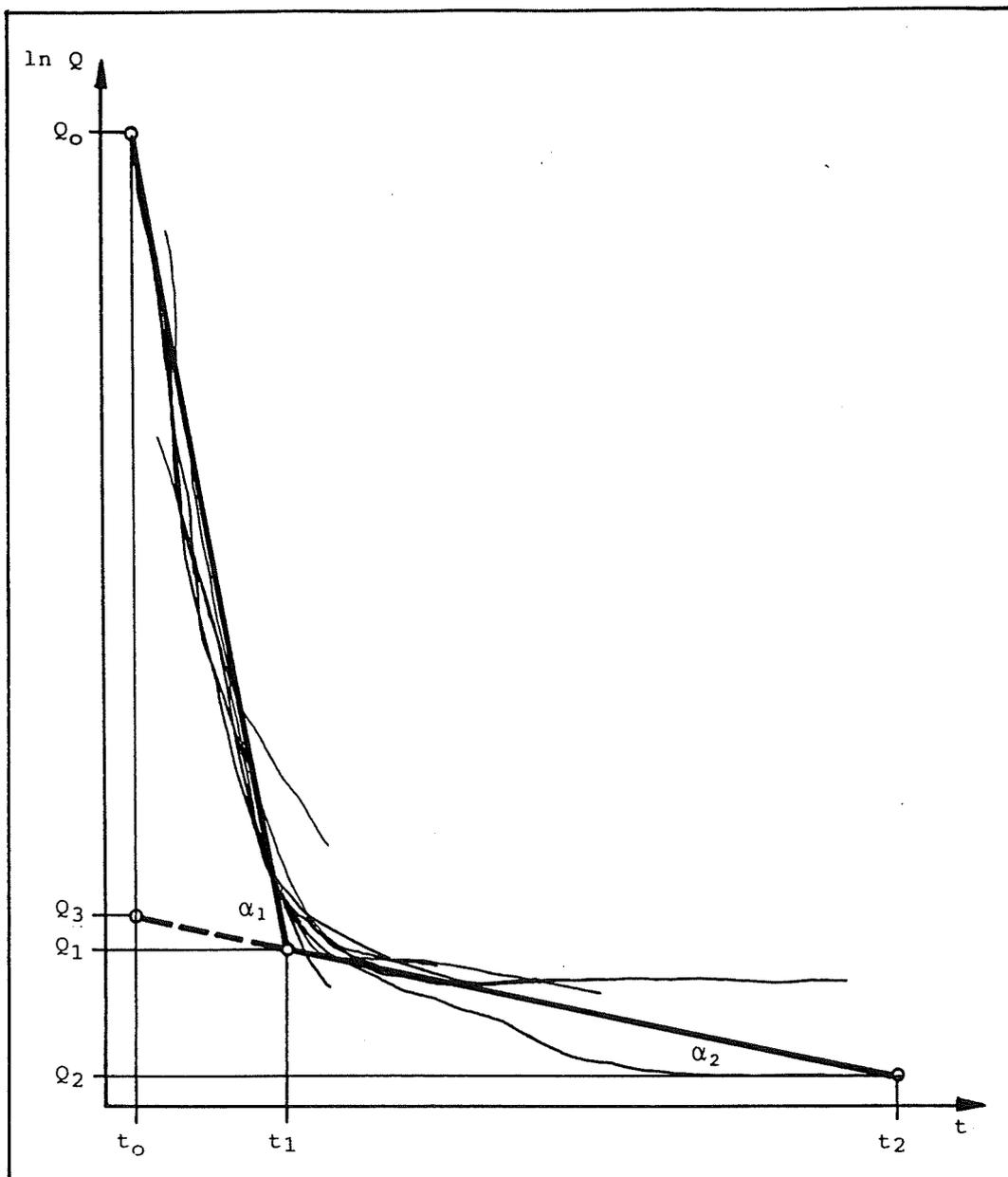


Abb. 8.9: Auslaufkurven der Station Schwendebach-EW

Tab. 8.4: Rezessionskoeffizienten und Speichervolumina (vgl. Abb. 8.8)

Station	Abfluss (l/s)				Rez.-koeff.		Dauer(d)			*10 ³ m ³			D	S
	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	α ₁	α ₂	t ₁	t ₂	V ₁	V ₂	V ₃			
Säntisthur-Unterwasser	4970	005	01	010	0.690	0.073	10	32	622	6.1	5.9	615	11.8	
Säntisthur-Lau	2350	110	03		0.204	0.901	15	19	948		10.6	959		
Mülibach-Alt St. Johann	1120	100	10		0.142	0.288	17	25	620		30	650		
Dorfbach-Alt St. Johann	685	114	42	279	0.106	0.053	17	36	468	271	187	197	458	
Gätterli-Wasserauen	65	6	4	7	0.238	0.018	10	32	21	5.5	28	15.9	32.9	
Schwendebach-EW	2800	140	90	162	0.375	0.018	8	32	614	104	657	510	761	
Tschuder-Wasserauen	865	20	1		0.343	0.499	11	17	213		3.5	217		
Brüelbach-Pfannenstiel	470	75	6	127	0.367	0.105	5	29	93	42.7	62	50.3	104	

Die Werte der Rezessionskoeffizienten deuten bei allen Stationen auf eine hohe Verkarstung hin. In Tabelle 8.5 sind zum Vergleich einige Werte aus anderen Karstgebieten angeführt.

Tab. 8.5: Rezessionskoeffizienten aus verschiedenen Karstgebieten

	hohe Schüttung α ₁	niedere Schüttung α ₂
Fontaine de Vaucluse (1)	0.10-0.007	0.01
Areuse (Jura) (2)		0.026
Rawil (5 Stationen) (3)		0.0017-0.07

- (1) MATHESS, UBELL 1983:117
- (2) TRIPET 1973:103
- (3) WILDBERGER 1981:147

Ein besonderes Rezessionsverhalten zeigen Quellen und Messstationen, die trocken fallen (Säntisthur-Lau, Mülibach-Alt St. Johann, Tschuder-Wasserauen). Im letzten Teil des Auslaufens fallen sie steil ab, und der Rezessionskoeffizient α nimmt zu, da bereits kleinste Versickerungsmengen bei niederen Abflusswerten eine starke Erhöhung des Rezessionskoeffizienten bewirken. Bei der Volumenberechnung wurde bei diesen Stationen auf eine Unterscheidung von Drainage- und Speicherraumanteil verzichtet. Der ausgesprochen hohe Wert von α₁ bei der Säntisthur-Unterwasser ist auf die Versickerung im Chämmerlitobel zurückzuführen (vgl. Kap. 12).

Bei den berechneten Volumina muss berücksichtigt werden, dass durch die Berechnung nur das ausfliessbare Volumen erfasst wird und nicht der gesamte Karstwasserspeicher. Für die Beurteilung der Volumina kann der Seealpsee mit einem Seeinhalt von 1.129 Mio. m³ als Vergleich dienen.

8.4. Abflussverhältnisse einzelner Gebiete

8.4.1 Wasserauen

Die drei Abflussmessstationen im Gebiet von Wasserauen (2 am Schwendebach und 1 beim Tschuder) erlauben eine detaillierte Analyse der Abflussverhältnisse. Abbildung 8.10 gibt einen schematischen Ueberblick der Situation. Die mittleren monatlichen Abflüsse sind in Abbildung 8.11 aufgetragen. Die Differenz Q_D entspricht der Summe der Zu- und Wegflüsse zwischen den Stationen. Im Jahresmittel entspricht die Summe aus Tschuder-Wasserauen, Schwendebach-EW, turbinierem Wasser des EW 80% der Abflussmenge der Station Schwendebach-Ditzes. Die Quellen beim Kieswerk und der Bach aus dem Hüttentobel dürften den Hauptanteil von Q_D ausmachen. Ein grösserer Grundwasserzufluss ist auszuschliessen, da der Grundwasserspiegel im südlichen Teil beim Bahnhof und beim Grundwasserpumpwerk 1-12 m unter dem Wasserspiegel des Schwendebaches liegt (Messungen Nov.72 bis Okt. 73, NAENNY 1973). Erst bei der Abflussmessstation Ditzes liegt der Grundwasserspiegel über dem Wasserspiegel des Schwendebaches.

Der Jahresverlauf von Q_D zeigt durchwegs positive Werte. Der frühe Abfall bereits im Juni deutet auf die tiefe Lage der Einzugsgebiete der Zuflüsse hin. Auch im trockenen Herbst bleibt Q_D positiv. Dieser Beitrag stammt zu einem Teil aus dem Direktabfluss von Niederschlägen. Der Vergleich von Momentanwerten bei den tiefsten Niederwasserständen ist problematisch, da die beiden Abflussmessstationen in diesem Bereich auf Grund der Querschnitte etwas ungenaue Werte liefern. Eine bedeutendere, direkte Infiltration ins Grundwasser kann nicht nachgewiesen werden, obwohl dies auf Grund der Grundwasserspiegelverhältnisse möglich wäre. Das Bachbett des Schwendebaches ist offensichtlich stark kolmatiert, da der Bach wegen dem Speichereinfluss des Sees nur relativ geringe Hochwasserspitzen aufweist. Die Versickerung ins Porengrundwasser einer austretenden Hangschuttquelle rund 500 m SSE des Tschuders ist aber klar erkennbar.

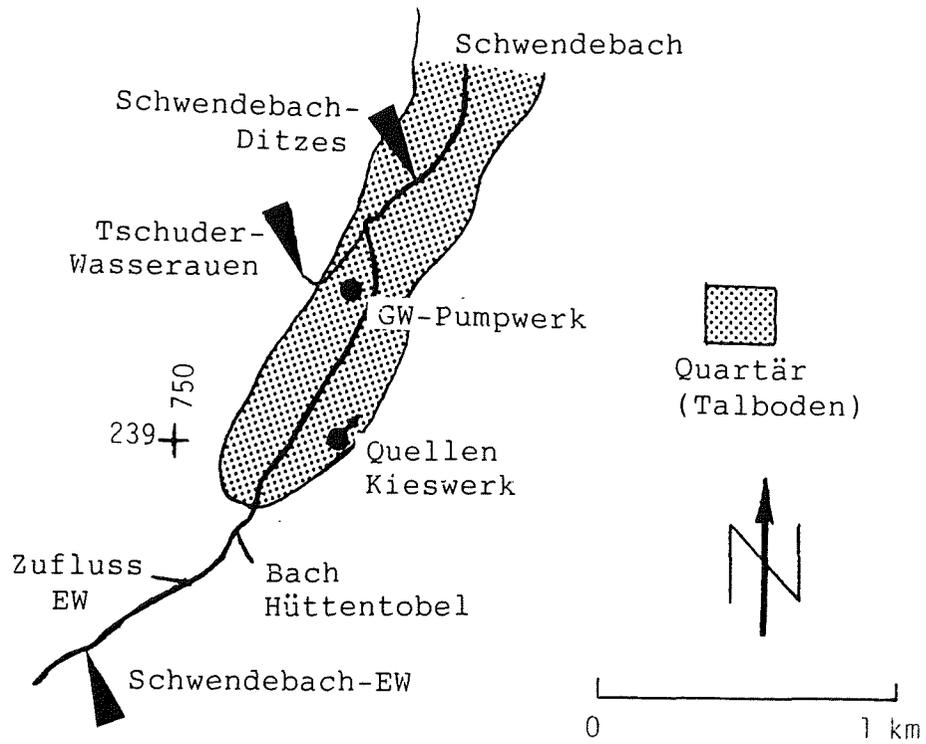
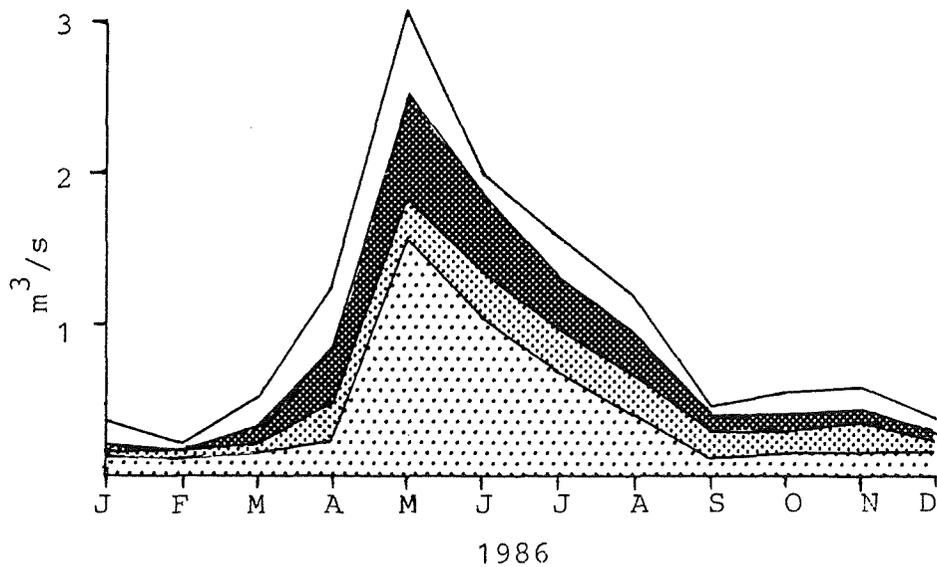


Abb. 8.10: Uebersichtsskizze Wasserauen



mittlere monatliche Abflussmengen:

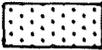
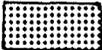
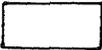
-  Schwendebach-EW
-  Zufluss EW (turbinieretes Wasser)
-  Tschuder-Wasserauen
-  Differenz Q_D (Andere Zuflüsse)
-  Schwendebach-Ditzes

Abb. 8.11: Abflussanteile der Station Schwendebach-Ditzes

8.4.2 Oberes Toggenburg

Im oberen Toggenburg ist eine ganze Reihe von Messstationen im Zusammenhang mit den Grundwasseruntersuchungen errichtet worden, die einen guten Einblick in die Abflussverhältnisse des Gebietes geben. Es werden hier insbesondere die Daten im Grundwassergebiet von Unterwasser-Alt St. Johann ausgewertet. Auf die speziellen Fliessverhältnisse der Sämtisthur oberhalb Unterwasser wird im Kapitel 12 eingegangen. Abbildung 8.12 zeigt die Abflussanteile am Gesamtabfluss bei der Station Thur-Bürgerheim für das Jahr 1986 in monatlicher Auflösung. Der Abfluss bei der Station Thur-Klostobel wird im Jahresmittel zu 65% von der Sämtisthur gespiesen. Unterhalb dieser Station fließen der Thur vor allem die Quellen von Alt St. Johann zu, die in ihrer Summe bedeutend mehr Wasser führen als die Thur oberhalb der Quellzuflüsse.

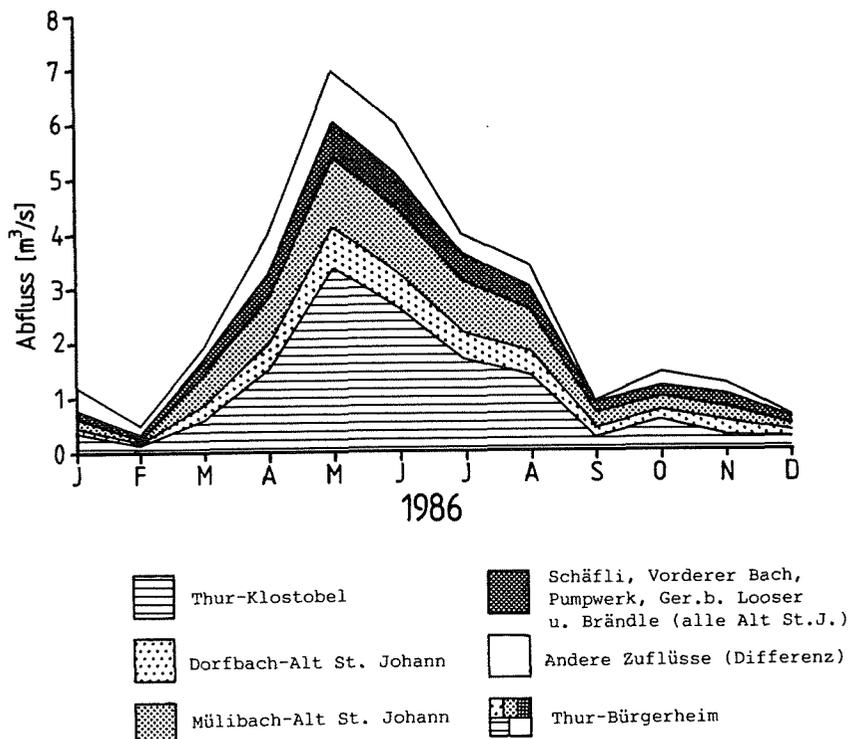
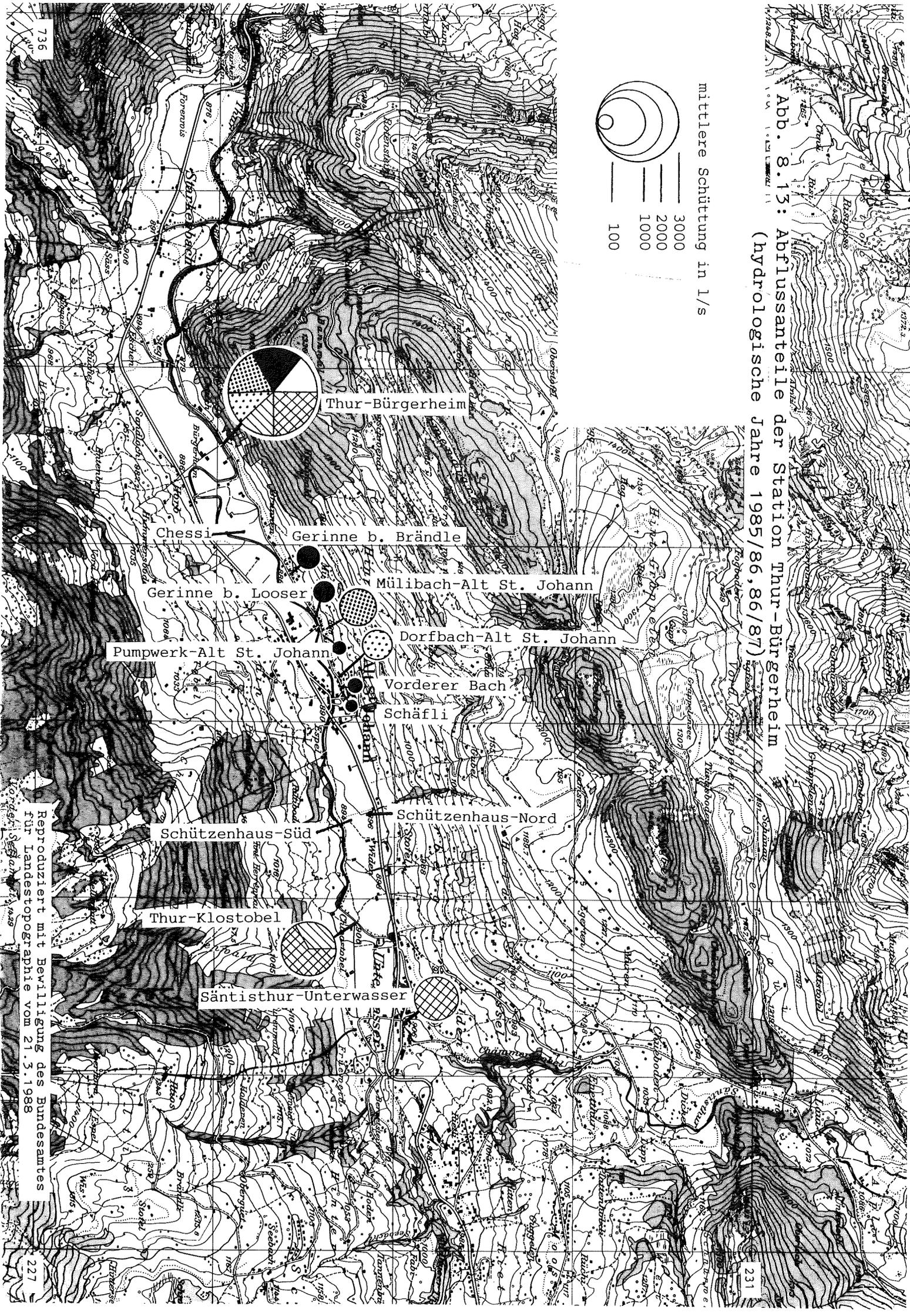
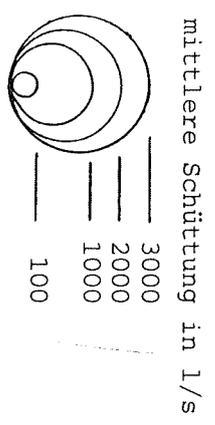


Abb. 8.12: Jahresgang des Abflusses im oberen Toggenburg

Die grössten Einzelaustritte sind die Mühlequelle, die wegen ihrer erhöhten Lage im Herbst trocken fallen kann, und der Dorfbach beim alten Schlachthaus. Zusammengefasst aufgetragen sind eine Reihe kleinerer Quellen, die mit Ablespegeln erfasst worden sind.

Abb. 8.13: Abflussanteile der Station Thur-Bürgerheim
(hydrologische Jahre 1985/86, 86/87)



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes
für Landestopographie vom 21.3.1988

Die Summe der erfassten Abflüsse ist durchwegs etwas kleiner als der Gesamtabfluss beim Bürgerheim. Dies ist auf unerfasste Quellaustritte, kleinere zufließende Gerinne und Oberflächenabfluss bei Niederschlägen zurückzuführen.

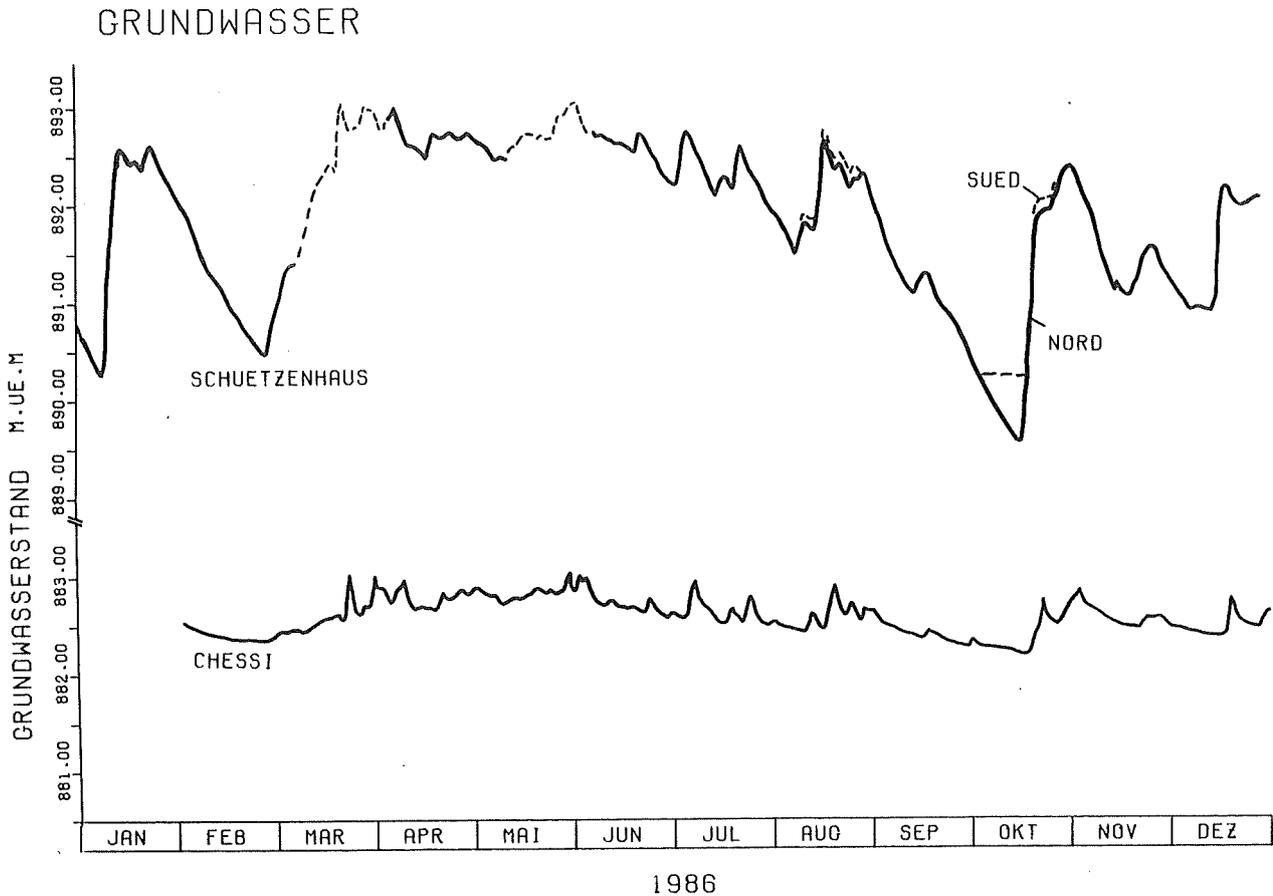


Abb. 8.14: Grundwasserganglinien im oberen Toggenburg (Situation siehe Abb. 8.13)

Der Grundwasserabfluss bei der Station Thur-Bürgerheim ist höchstens gering, da die Durchlässigkeiten des Porengrundwasserträgers zur Thurschlucht hin abnimmt. Bereits oberhalb, bei der Grundwassermessstation Chessi, liegt der Grundwasserspiegel permanent über der Thur. Dies drückt sich auch in der Charakteristik der Grundwasserganglinien aus (Abb. 8.14). Der Kurvenverlauf bei der Station Chessi weist auf eine direkte Wechselbeziehung mit einem Oberflächengewässer hin, auf Grund der Höhenlage von Thur und Grundwasserspiegel handelt es sich um eine permanente Exfiltration. Die beiden Ganglinien vom Schützenhaus deuten auf eine perkulative Infiltration von Zuflüssen hin. Durch

die lokale Neubildung aus Niederschlägen ist der lange Hochstand im Frühsommer nicht erklärbar.

9. AUSWERTUNG NATUERLICHER TRACER

9.1. Uebersicht

9.1.1 Allgemeine Charakterisierung der Wässer

Der Ablauf der Mineralisation des Niederschlagswassers bis zum Quellaustritt ist ein vielfältiger Prozess. Die Zusammensetzung der Wasserinhaltsstoffe wird einerseits durch die Verhältnisse im Aquifer bestimmt, d.h. durch seine Ausbildung und die herrschende Wasserzirkulation, andererseits spielen die Verhältnisse ausserhalb des Aquifers eine Rolle. Dazu gehören die Zusammensetzung des Niederschlags und die bioklimatischen Verhältnisse (CO₂-Produktion).

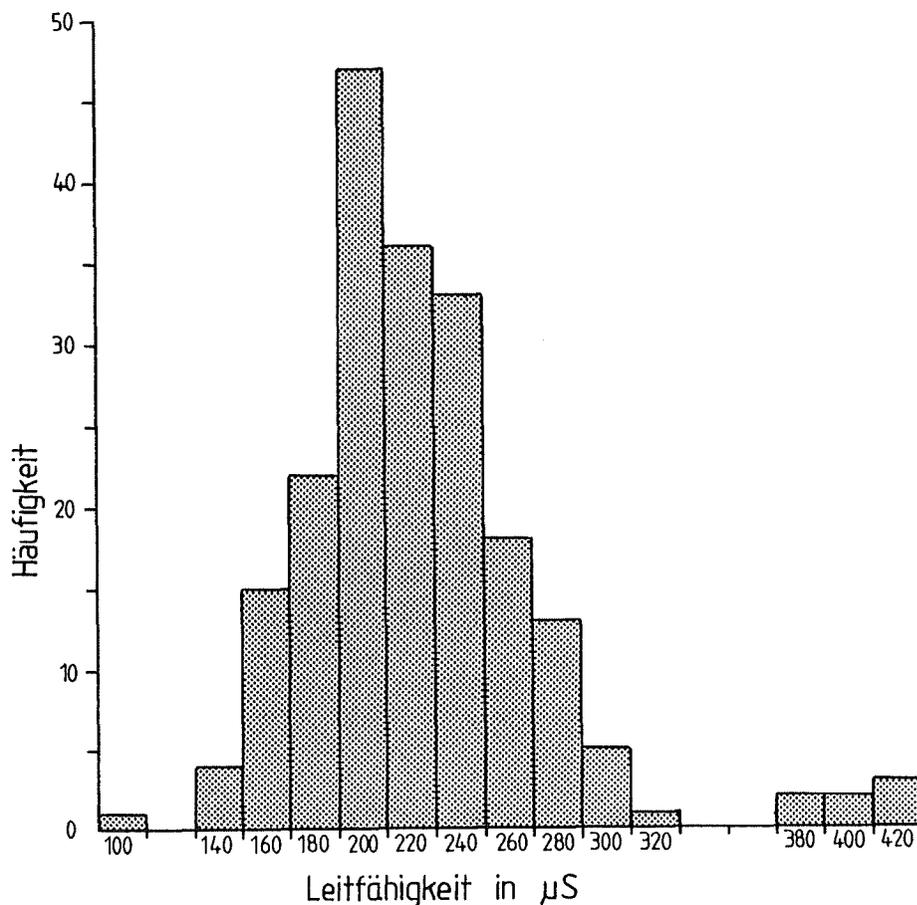


Abb. 9.1: Häufigkeitsverteilung der Leitfähigkeit

In Karstwässern spielen im allgemeinen physikalische Lösungsvorgänge, wo sich die Konzentrationen mehr und mehr der Sättigung nähern, eine untergeordnete Rolle. Es handelt

sich vor allem um chemische Prozesse (Korrosion), die reversibel sind, und bei denen sich Gleichgewichte einstellen, die sich bei der Änderung der Konzentration einer Komponente oder der Temperatur verschieben. Die korrosive Wirkung des Wassers ist bekanntlich ein entscheidender Faktor in der Entwicklung eines Karstwassersystems. Deshalb wird im Kapitel 9.1.3 noch auf das wichtige Kalk-Kohlesäure-Gleichgewicht eingetreten.

Die Wässer des Alpsteins sind wie in den meisten Karstgebieten in unseren Breiten gering mineralisiert. Die Gesamtmineralisation eines Wassers lässt sich gut durch die elektrolytische Leitfähigkeit charakterisieren. Die Abbildung 9.1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Leitfähigkeitswerte. Diese Verteilung entspricht nach den Angaben von MUELLER et al. (1983:510) den Werten von hochalpinen bis voralpinen Karstgebieten. Die Werte über 400 μS stammen von kleineren Quellen im Rheintal, bei denen die hohe Mineralisation sehr wahrscheinlich vor allem aus der Bodenschicht stammt, da das Quelleinzugsgebiet zu einem grossen Teil im bedeckten Karst liegt.

Die Wässer können als Calcium-Hydrogenkarbonat-Wässer bezeichnet werden. Das Calcium macht rund 95 % (mval %) der Kationensumme und das Hydrogenkarbonat 92% der Anionensumme aus. Im allgemeinen kann gesagt werden, dass älteres Wasser (Tritiumalter) härter ist (BURGER, 1983: 560). Dies darf aber nur als grobe Regel für den Vergleich von Wässern, die sonst gleichen Bedingungen unterliegen, gelten, spielen doch für die Mineralisation insbesondere die ersten Dezimeter der Infiltrationsstrecke, also die Ausbildung der Bodenschicht, eine grosse Rolle.

Tab. 9.1: Korrelationsmatrix der hydrochemischen Daten

	T	LF	KH	CL	GH	CA	SO ₄	NO ₃
Temperatur (T)	1.00							
Leitfähigkeit (LF)	0.13	1.00						
Karbonathärte (KH)	0.12	0.97	1.00					
Chlorid (CL)	0.10	0.61	0.55	1.00				
Gesamthärte (GH)	0.10	0.98	0.99	0.55	1.00			
Calcium (CA)	0.09	0.98	0.99	0.57	0.99	1.00		
Sulfat (SO ₄)	-0.01	0.57	0.51	0.24	0.56	0.52	1.00	
Nitrat (NO ₃)	-0.24	0.52	0.45	0.38	0.50	0.34	0.34	1.00

Die Korrelationsmatrix (Tab. 9.1) zeigt die hohe Korrelation zwischen Karbonathärte, Gesamthärte, Calcium-Gehalt und Leitfähigkeit. Dies erlaubt die drei Werte mittels der leicht messbaren Leitfähigkeit gut zu schätzen. Dazu können auf Grund der durchgeführten Analysen im Alpstein folgende Gleichungen verwendet werden:

$$\begin{aligned} \text{KH}(\text{°fH}) &= 0.0453 * \text{el. Leitfähigkeit} + 1.1086 & r^2 &= 0.95 \\ \text{GH}(\text{°fH}) &= 0.0494 * \text{el. Leitfähigkeit} + 0.9296 & r^2 &= 0.97 \\ \text{Ca}(\text{°fH}) &= 0.0475 * \text{el. Leitfähigkeit} + 0.6006 & r^2 &= 0.96 \end{aligned}$$

Die Magnesiumkonzentration wurde aus der Gesamthärte und dem Calcium-Gehalt berechnet. Sie umfasst daher auch weitere ev. vorhandene Erdalkalien (Ba, Sr). Dieses Vorgehen ist bei den gegebenen geringen Werten statthaft. Es ergaben sich durchwegs geringe Magnesiumkonzentrationen. Der höchste Wert liegt bei 4,2 mg/l, die meisten Werte liegen aber unter 2 mg/l. Die Berechnung des Ca/Mg-Verhältnisses, das in Karstwasseruntersuchungen oft zur Abgrenzung verschiedener Wässer verwendet wird, ist deshalb nur wenig aussagekräftig. Schwankungen des Ca/Mg-Verhältnisses beruhen v.a. auf sehr geringen Schwankungen des Mg-Gehaltes, die innerhalb des Messfehlers liegen.

Die Konzentrationen von Chlorid, Sulfat und Nitrat sind durchwegs gering:

Chlorid	bis 1,5 mg/l (2 kleinere Quellen im meist <1 mg/l Rheintal bis 7,6 mg/l)
Sulfat	2,0-12 mg/l (5 kleinere Quellen im Rheintal bis 20,5 mg/l)
Nitrat	0,4-6,2 mg/l

Nach CHAUVE et al. (1982: 23) hat Chlorid seinen Ursprung ausserhalb des Karstwassersystems. Es wird durch den Niederschlag, aus einem anderen Wassersystem (z.B. Bodenwassersystem) oder durch Verschmutzung eingetragen. Chlorid wird deshalb auch als Verschmutzungsindikator verwendet. Der Chloridgehalt des Niederschlags beträgt 0.4-1.7 mg/l (Messungen Luterbach BE, H.R. Wernli). Untersuchungen von CHAUVE et al. (1982:25) ergaben für den Jura einen natürlichen Chloridgehalt im Karstwasser von 1-3 mg/l. Auf Grund der klimatischen Verhältnisse ist der natürliche Chloridgehalt im Karst des Alpsteins sicher ge-

ringer. Die gemessenen Werte entsprechen somit etwa dem natürlichen Gehalt.

Sulfat wird durch den Niederschlag eingetragen, wird aber zum Teil auch aus dem Gestein herausgelöst oder stammt aus landwirtschaftlicher Verschmutzung oder Abwässern (CHAUVE et al. 1980:111). Die gemessenen Konzentrationen lassen darauf schliessen, dass ausser dem Niederschlagseintrag höchstens wenig Sulfat vom Karstwasser gelöst wird. Der Sulfatgehalt des Niederschlags unterliegt bedeutenden Schwankungen, er kann im Winter während der Heizperiode bis 20 mg/l betragen (Messungen Luterbach BE, H.R. Wernli).

Die schlechte Wasserlöslichkeit von organischen Stickstoffverbindungen und die aeroben Verhältnisse im Karstwasser verhindern Denitrifikationsprozesse. Somit erfolgt die Stickstoff-Auswaschung fast nur in Form von Nitrat (SIMMLEIT, HEMPFLING, 1986:611). Für die Messung des Stickstoffaustrages kann deshalb auf die Messung von Ammonium und Nitrit verzichtet werden. Das Nitrat hat seinen Ursprung auch ausserhalb des Karstwassersystems (CHAUVE et al., 1982:23). Untersuchungen in einem waldbedeckten Karstgebiet (nördl. Frankenalb, BRD) ergaben eine natürliche Nitratbelastung von rund 10 mg/l (SIMMLEIT, HEMPFLING, 1986:612). Die Werte im teilweise nackten Karst des Alpsteins liegen deutlich tiefer. Die gemessenen Werte dürften weitgehend dem natürlichen Eintrag aus Niederschlag und Bodenwassersystem entsprechen. Im Niederschlag beträgt der Nitratgehalt 0.9-5.0 mg/l (Messungen Luterbach BE, H.R. Wernli). Bedeutend ist zusätzlich der Stickstoffeintrag durch Ammonium (0.6-3.8 mg/l NH_4).

Insgesamt kann gesagt werden, dass die mineralischen Wasserinhaltsstoffe weitgehend Konzentrationen aufweisen, die dem natürlichen Eintrag aus Niederschlag und Bodenwassersystem und der Lösung im Karstwassersystem entsprechen. Umfassende Untersuchungen der EAWAG (noch unpubliziert, Mitt. A. Frutiger) an der Säntisthur-Laufer ergaben ebenfalls ein ähnliches Ergebnis. Dass die Konzentrationen vieler Inhaltsstoffe im Niederschlag durch die grossräumige Umweltverschmutzung heute z.T. stark erhöht sind, sei hier nur am Rande erwähnt, da diese Problematik nicht im Rahmen dieser Untersuchungen angegangen werden muss.

Trotz der geringen Gehalte an Chlorid, Sulfat und Nitrat belegen die Resultate aber keineswegs, dass die Alpsteinwässer unbedenklich als Trinkwasser verwendet werden kön-

nen. Die bakteriologischen Untersuchungen der betreffenden Wasserversorgungen zeigten die Probleme der bakteriologischen Verunreinigung. Die entsprechenden Konsequenzen sind durch den Einbau von Filter und Chlorieranlagen hier auch gezogen worden.

Die Temperatur ist ein guter, natürlicher Tracer (BURGER 1983:558). Karstquellen reagieren oft recht heftig auf wechselnde thermische Inputverhältnisse. Die bestimmenden Faktoren des thermischen Regimes lassen sich wie folgt gliedern:

- saisonaler Effekt, der den Jahresgang bestimmt
- Kälte- und Wärmeeinbrüche, die zu plötzlichen Änderungen führen
- regulierender Einfluss des Karstspeichers

Eine konstante Quelltemperatur im Jahresverlauf, wie sie bei einigen Quellen anzutreffen ist, lässt auf einen bedeutenden, ausgleichenden Karstwasserspeicher schliessen.

9.1.2 Hauptkomponentenanalyse

Verfahren

Eine Hauptkomponentenanalyse dient der Bestimmung der entscheidenden Grössen aus einer umfangreichen Datenmenge. Eine geringe Anzahl von Faktoren soll einen möglichst grossen Anteil der Gesamtvarianz aller Variablen erklären. Die Faktoren sind hypothetische Grössen, sie sind nicht direkt messbar, können aber dazu dienen, die Zusammenhänge zwischen den Variablen zu "erklären" (BAHRENBERG, GIESE 1975: 205). Die einzelnen, beobachteten Werte können als lineare Kombinationen dieser Faktoren dargestellt werden (UEBERLA 1977: 52).

Weist das Faktorenmuster der Faktoren hohe Ladungen auf einzelnen Variablen auf, können diese als die bestimmenden Grössen betrachtet werden, da die Faktorenladungen den Korrelationen der Variablen mit dem Faktor entsprechen (UEBERLA 1977: 79). Für zukünftige Untersuchungen können so die wichtigsten Variablen bestimmt werden, damit ist eine Optimierung der Datenerhebung möglich.

Sind in einer Hauptkomponentenanalyse die Eigenwerte aller Faktoren (Anzahl Faktoren=Anzahl Variablen) bestimmt worden, kann eine Anzahl Faktoren extrahiert werden. Ein weit verbreitetes Extraktionskriterium, das auch hier angewendet worden ist, berücksichtigt nur Faktoren mit einem Eigenwert >1 . Bei Eigenwerten <1 ist der "erklärte" Varianzanteil des betreffenden Faktors kleiner als die Einheitsvarianz der Variablen (UEBERLA 1977: 125). Die Kommunalitäten sind im angewandten Verfahren 1 gesetzt worden. Es ist eine Rotation der extrahierten Faktoren nach dem Varimax-Kriterium durchgeführt worden.

Eine umfassende, verständliche Darstellung der Theorie und Anwendung von Hauptkomponenten- und Faktorenanalyse bietet UEBERLA (1977). Alle Berechnungen sind mit dem Softwarepaket SAS durchgeführt worden.

Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse

In die statistische Analyse sind 143 Analysen der Wasserbeschaffenheit einbezogen worden, die acht Messgrößen umfassen: Temperatur, el. Leitfähigkeit, Karbonathärte, Chlorid, Gesamthärte, Calcium, Sulfat, Nitrat. Für die Berechnungen werden die einzelnen Variablen standardisiert. In Abbildung 9.2 sind die Eigenwerte aller 8 Faktoren aufgezeichnet, die nötig sind um die gesamte Varianz zu erklären. Mit den beiden ersten Faktoren können bereits 75% der Gesamtvarianz erklärt werden.

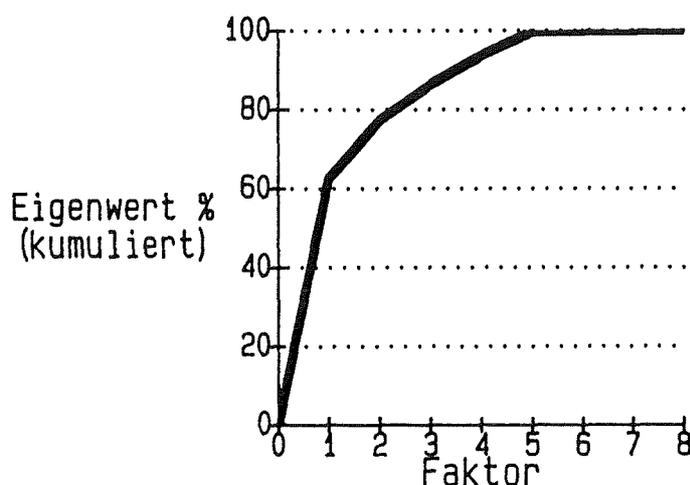


Abb. 9.2: Kumulierte Eigenwerte der Faktoren

Diese beiden erfüllen auch das Extraktionskriterium: Eigenwert >1. Die Faktorenladungen der beiden extrahierten Faktoren nach der Rotation lauten:

	Faktor 1	Faktor 2
Temperatur	0.158	0.913
Leitfähigkeit	0.987	-0.004
Karbonathärte	0.969	0.029
Chlorid	0.658	0.025
Gesamthärte	0.982	-0.020
Calcium	0.981	-0.040
Sulfat	0.605	-0.176
Nitrat	0.556	-0.578

Dieses Faktorenmuster ist in Abbildung 9.3 graphisch dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der Faktor 1 hohe Ladungen bei jenen Variablen aufweist, die die Gesamtmineralisation charakterisieren, respektive diese hauptsächlich ausmachen. Der Faktor 2 weist insbesondere eine hohe Ladung auf der Variablen Temperatur auf.

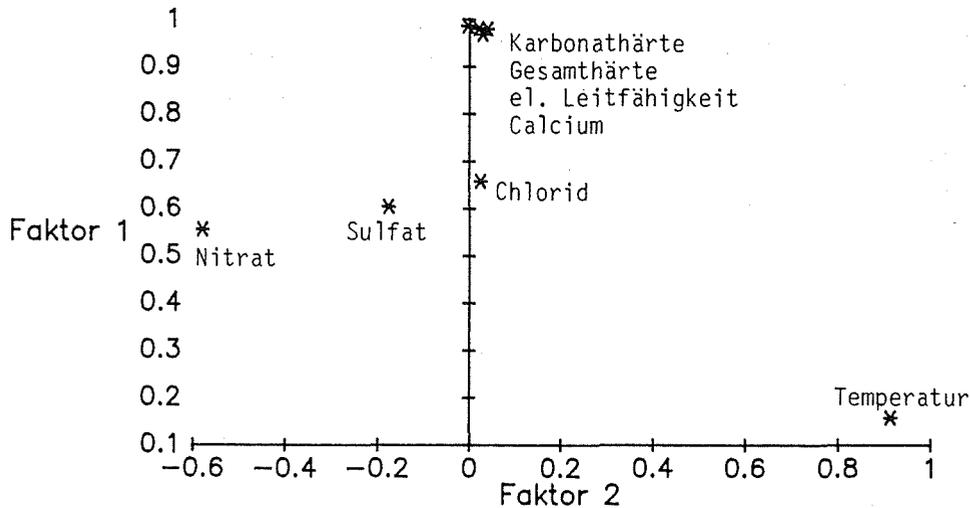


Abb. 9.3: Faktorenmuster

Die Aufteilung der Einheitsvarianz der Variablen auf die Faktoren (Abb. 9.4) zeigt, dass durch die beiden extrahierten Faktoren insbesondere die Varianz von fünf Variablen sehr gut abgedeckt ist. Von der Gesamtvarianz werden rund 77% durch die beiden Faktoren erfasst.

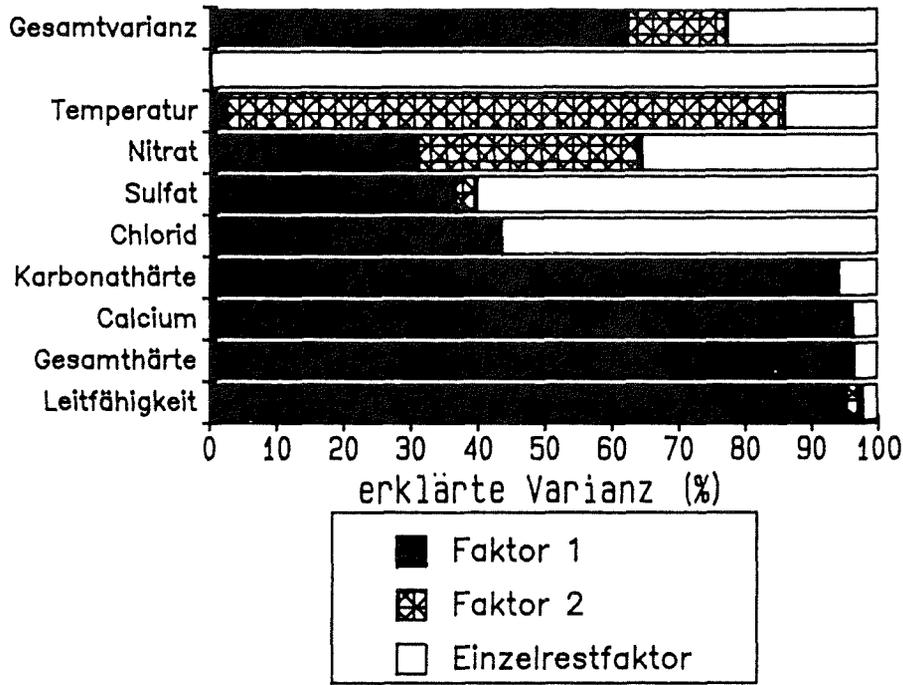
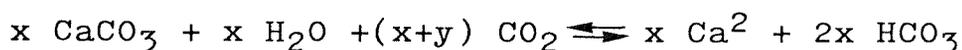


Abb. 9.4: Aufteilung der Einheitsvarianz der Variablen auf die Faktoren

Die Resultate der Hauptkomponentenanalyse rechtfertigen eine Reduktion der Messungen auf Temperatur und Leitfähigkeit an Stelle der acht erhobenen Parameter zur allgemeinen Charakterisierung der Wässer. Dies schliesst nicht aus, dass für spezielle Fragestellungen auch die anderen Parameter beigezogen werden müssen.

9.1.3 Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

Die Löslichkeit von CaCO_3 (Kalk) in reinem Wasser ist gering, sie steigt jedoch in Gegenwart von gelöstem Kohlendioxid rasch an. Der Lösungsvorgang läuft nach folgendem Gleichgewichtssystem ab (MATTHESS, UBELL 1983:216):



wobei $y = K_T \cdot x^3$

K_T = temperaturabhängiger
Proportionalitätsfaktor

Die Gleichgewichtskonstante dieses Systems ist auch vom Fremdeinfluss der anderen im Wasser gelösten Ionen abhängig. Zur Beurteilung, ob sich ein untersuchtes Wasser im Gleichgewichtszustand befindet, kann der sogenannte LANGE-LIER-Index berechnet werden (MATTHESS, 1973:39):

$$\text{LANGELIER-Index } I = \text{pH}_{\text{Gemessen}} - \text{pH}_{\text{Gleichgewicht}}$$

Negative Werte von I zeigen kalkaggressive Kohlensäure, positive Werte Kalkübersättigung an.

Der Wert $\text{pH}_{\text{Gleichgewicht}}$ kann dabei wie folgt berechnet werden:

$$\text{pH}_{\text{Gleichgewicht}} = \text{pK}^* - \lg C_{\text{Ca}} - \lg C_{\text{HCO}} + \lg f_L$$

$\text{pH}_{\text{Gleichgewicht}}$: pH eines natürlichen Wassers im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

pK^* : temperaturabhängige Konstante

$C_{\text{Ca}}, C_{\text{HCO}}$: Konzentration von Ca^{2+} resp. HCO_3

$\lg f_L$: Von der Ionenstärke der Wasserinhaltsstoffe abhängige Grösse

Die Grösse $\lg f_L$ weist für die gering mineralisierten Wässer des Alpsteins nur kleine Schwankungen auf. Sie ist deshalb für die Berechnung konstant mit 0.15 eingesetzt worden. Für die temperaturabhängige Konstante pK^* kann eine lineare Abhängigkeit im Bereich von 4-12 Grad C verwendet werden. Daraus ergibt sich folgende Gleichung die für die Berechnungen verwendet wurde:

$$\text{pH}_{\text{Gleichgewicht}} = (8.798 - (T-4) \cdot 0.026125) - \lg C_{\text{Ca}} - \lg C_{\text{HCO}} + 0.15$$

T: Temperatur des Wassers

Mit dieser vereinfachten Gleichung kann der LANGELIER-Index ohne tabellierte Werte direkt routinemässig mit einem Programm aus den hydrochemischen Analysen berechnet werden. Es ergibt sich eine Rechengenauigkeit des pH-Wertes von ± 0.03 .

Das Erreichen des Gleichgewichtszustandes bedeutet aber nicht unbedingt das Ende der korrosiven Phase eines Karst-

wassers. Es ist das Verdienst von BOEGLI(1964), auf die Bedeutung der Mischungskorrosion für Karstwasser hingewiesen zu haben. Bei der Mischung von Gleichgewichtswässern mit verschiedener Ca^{2+} -Konzentration entsteht wieder ein CO_2 -Ueberschuss und damit kalkaggressives Wasser. Die Mischungskorrosion ist in Abbildung 9.5 veranschaulicht. Die beiden Wässer W_1 und W_2 befinden sich im Gleichgewicht und liegen somit auf der eingezeichneten Gleichgewichtskurve. Ein Mischwasser der beiden liegt auf der Gerade W_1W_2 . Der entstehende CO_2 -Ueberschuss lässt sich so grafisch bestimmen.

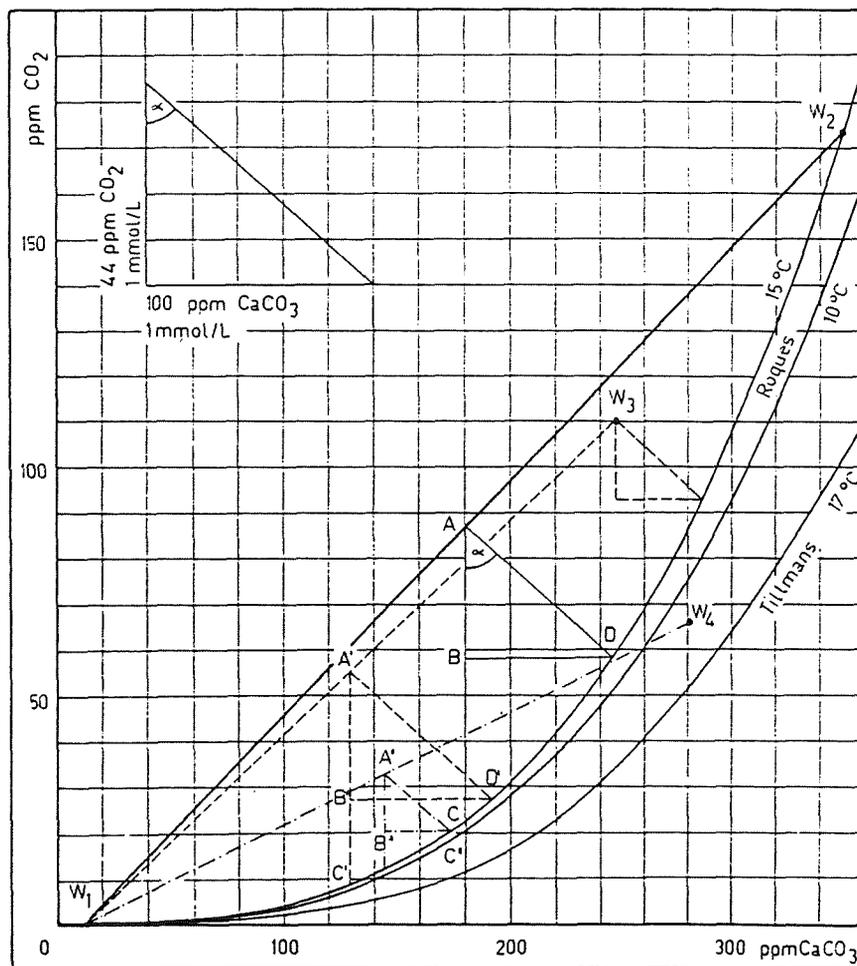


Abb. 9.5: Mischungskorrosion (aus BOEGLI 1978:37)

Die berechneten Werte $\text{pH}_{\text{Gleichgewicht}}$ der Alpsteinwässer liegen zwischen pH 7.8 und 8.5, also im basischen Bereich. Die bei den Quellen gemessenen Werte liegen durchwegs tiefer als der zugehörige Wert $\text{pH}_{\text{Gleichgewicht}}$. Der LANGE-LIER-Index beträgt -0.3 bis -1.3. Die Wässer weisen also überschüssige Kohlensäure auf und können Kalk lösen. Im

Gegensatz dazu weisen die Seen LANGEЛИER-Indices >0 auf. Die Werte liegen zwischen $+0.2$ und $+0.4$. Das Seewasser ist somit leicht mit Kalk übersättigt. Dies ist auf die Erwärmung des Wassers zurückzuführen, die eine geringere Löslichkeit von CO_2 zur Folge hat. Die Quellen mit einem hohen Seewasseranteil (Gätterli-Wasserauen, Mühlebach-Sennwald) weisen aber wiederum Werte <0 auf. Das Seewasser wird durch Mischung, Abkühlung und Aufnahme von CO_2 im Karstwassersystem rasch wieder leicht kalkaggressiv.

9.2. Untersuchung einzelner Quellen

Bei insgesamt fünf wichtigeren Quellen sind 1985 und 1986 intensivere Untersuchungen der Wasserbeschaffenheit vorgenommen worden. Es erfolgte eine monatliche Probenahme. Zusätzlich liegen die Ergebnisse registrierender Temperatur- und Leitfähigkeitsmessgeräte vor.

Es stellt sich die Frage, inwieweit die Schwankungen der gemessenen Parameter durch Messungen in diesem Intervall erfasst werden können. BAKALOWICZ (1976:50) weist darauf hin, dass sich die Variation der Parameter strukturieren lässt. Einer saisonalen Schwankung ist eine kurzzeitige überlagert. Wie weit eine Charakterisierung möglich ist, hängt von der Bandbreite der Schwankungen von saisonaler bzw. kurzzeitiger Schwankung ab. Die Resultate zeigten, dass sich im Alpstein mit den erhobenen Daten die saisonalen Schwankungen recht gut charakterisieren lassen, auch wenn die gemessenen Werte innerhalb einer gewissen Bandbreite als zufällige Werte betrachtet werden müssen.

Die kurzzeitigen Schwankungen konnten bei einem Teil der Quellen auf Grund intensiverer Messungen erfasst werden. Diese Werte geben einen Ueberblick über die Bandbreite der kurzzeitigen Schwankungen. BAKALOWICZ und MANGIN (1980:75) zeigten, dass die Verteilung der Leitfähigkeitswerte einer Karstquelle nicht einer einfachen statistischen Verteilung entspricht. Sie kann deshalb nicht durch einfache statistische Parameter charakterisiert werden.

Im folgenden Kapitel beschränkt sich die Darstellung der Ganglinien auf Temperatur, Leitfähigkeit und Schüttung. Die Auswahl von Temperatur und Leitfähigkeit lässt sich durch die Hauptkomponentenanalyse begründen.

Bei der Betrachtung der Abbildungen 9.6-10 drängt sich die Frage auf, wie weit ein Zusammenhang zwischen Schüttung und Wasserbeschaffenheit besteht, und ob sich dieser Zusammenhang mathematisch formulieren lässt. Im Abschnitt 9.2.2 wird dieser Frage nachgegangen und ein Lösungsansatz aufgezeigt.

9.2.1 Interpretation der Ganglinien von Temperatur, Leitfähigkeit und Schüttung

Quelle Gätterl-Wasserauen

Es zeigte sich, dass alle erfassbaren Austritte gleiche Werte bezüglich Temperatur und Leitfähigkeit aufweisen (Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten), somit ist anzunehmen, dass alle Austritte aus dem gleichen Karstwassersystem gespiesen werden. Eine quantitative Erfassung der Quellgruppe ist durch die Lage im Bett des Schwendebaches schwierig. Deshalb wurde mittels je einer Abflussmessstation ein Quellaustritt (alte Fassung von 1928) und der Bach oberhalb des Zulaufes des EW gemessen. Bei Niederwasser (unter ca. 220 l/s) liefern die Quellen die gesamte Wassermenge bei der Abflussmessstation Schwendebach-EW.

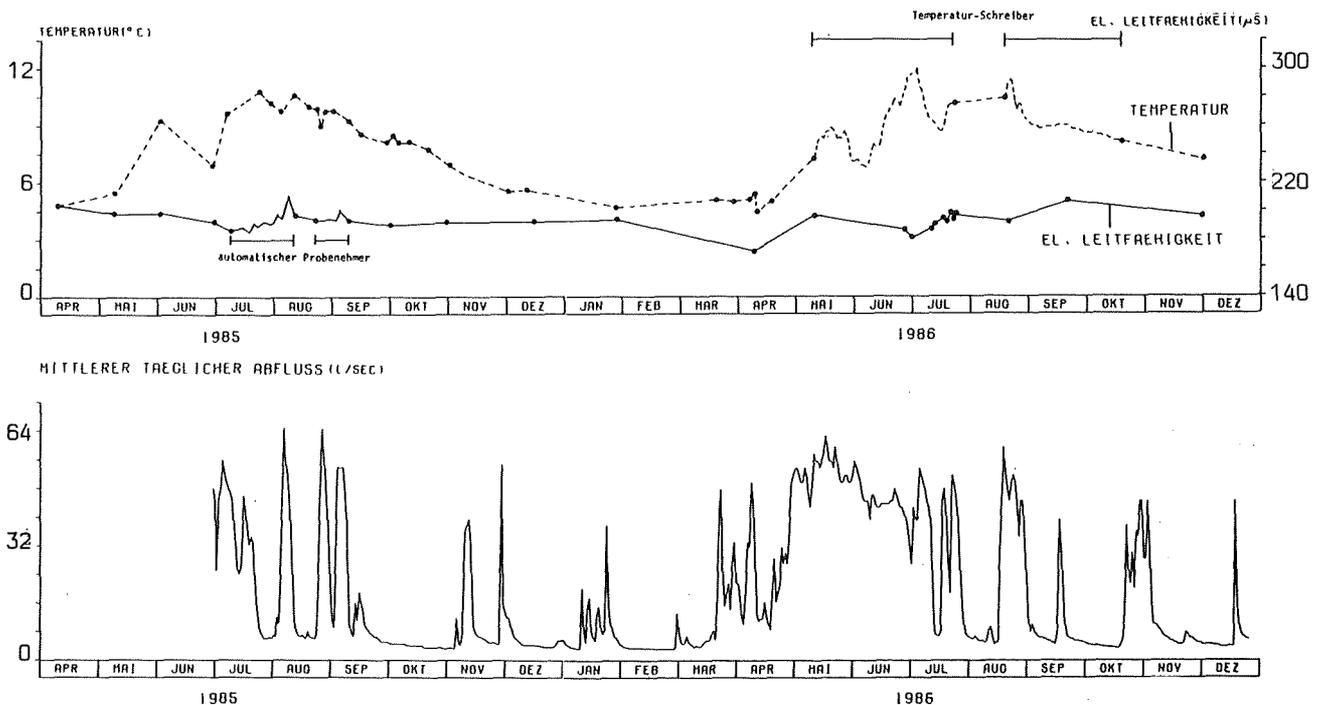


Abb. 9.6: Ganglinien von Schüttung, Temperatur und Leitfähigkeit, Gätterl-Wasserauen

Durch den grossen Anteil von zufliessendem Seewasser weist die Quelle eine grosse jährliche Temperaturschwankung auf. Während der Hochwasserperiode im Frühjahr und Frühsommer schwankt die Temperatur auch kurzfristig stark. Diese Schwankungen gehen im Herbst in eine kontinuierliche, langsame Abnahme über, da die Speisung durch die Schwinden bei Reslen (vgl. Markierversuche) wegfällt und die Speisung direkt aus dem See aus grösserer Tiefe erfolgt, wo die Temperaturschwankungen geringer sind. Der Seewasserspeicher bewirkt eine Dämpfung der Schwankungen der el. Leitfähigkeit, die im Jahresverlauf nur gering sind. Detailliertere Untersuchungen im Jahre 1985 zeigten, dass die el. Leitfähigkeit in der Folge von Hochwässern leicht ansteigt, wobei das Maximum mit geringer Verzögerung der Abflussspitze folgt. Bei einem Starkniederschlag wird höher mineralisiertes Wasser aus kleineren Klüften ausgepresst (Piston Flow), das wegen der hydraulischen Fortpflanzung der Hochwasserwelle erst nach der Abflussspitze bei der Quelle austritt (Trübungen bei Hochwasser beeinflussen die Leitfähigkeit kaum).

Quelle Mühlebach-Sennwald

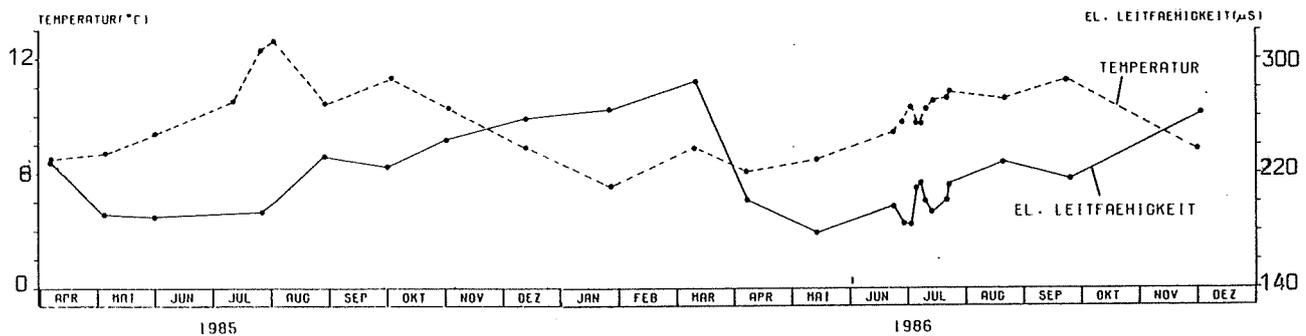


Abb. 9.7: Ganglinien von Temperatur und Leitfähigkeit, Mühlebach-Sennwald

Der Temperaturverlauf der Quelle wird vom Seewassereinfluss geprägt und weist ähnlich grosse Schwankungen wie die Gätteriquelle auf. Der starke Anstieg der Leitfähigkeit im Winter deutet auf das Ausfliessen von stärker mi-

neralisiertem Speicherwasser hin. Es ist also ein grösserer zwischenliegender Karstwasserspeicher anzunehmen.

Quelle Tschuder-Wasserauen

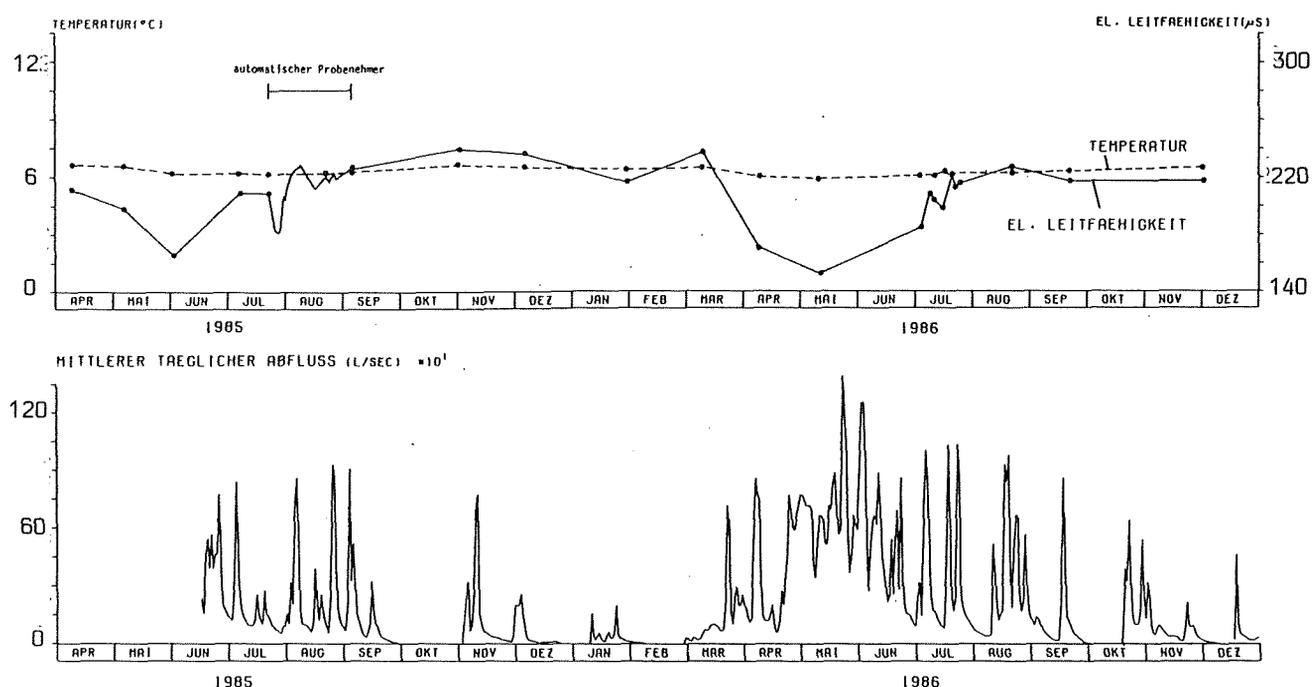


Abb. 9.8: Ganglinien von Schüttung, Temperatur und Leitfähigkeit, Tschuder-Wasserauen

Die Quelle weist eine ausserordentlich konstante Temperatur auf (6-6.5 Grad C), wobei das Maximum in die Wintermonate fällt, wo dem Karstwassersystem nur wenig Wasser zufließt. Diese Konstanz setzt einen Speicher mit bedeutender Pufferwirkung voraus, der einen bedeutenden Anteil der Abflussmenge liefert. In der Leitfähigkeit zeigt sich deutlich der Einfluss der Direktabflusskomponente, der mit dem Schmelzwasser im Frühjahr zu einem deutlichen Rückgang führt. Detailuntersuchungen im Sommer 1985 zeigten beim Gang der Leitfähigkeit während Hochwasserereignissen denselben Ablauf wie bei der Gätterquelle (Piston Flow Effekt).

Quelle Pfannenstiel-Brülisau

Der nachgewiesene Zusammenhang zum Sämtisersee (vgl. Kap. 10.5) spielt hier keine dominante Rolle. Obwohl der See im Sommer bis zum Grund hohe Temperaturen aufweist (REUTIMANN 1987), zeigt die Quelle nur geringe Temperaturschwankungen. Ein bedeutender direkter Seewasserzufluss ist also auszuschliessen.

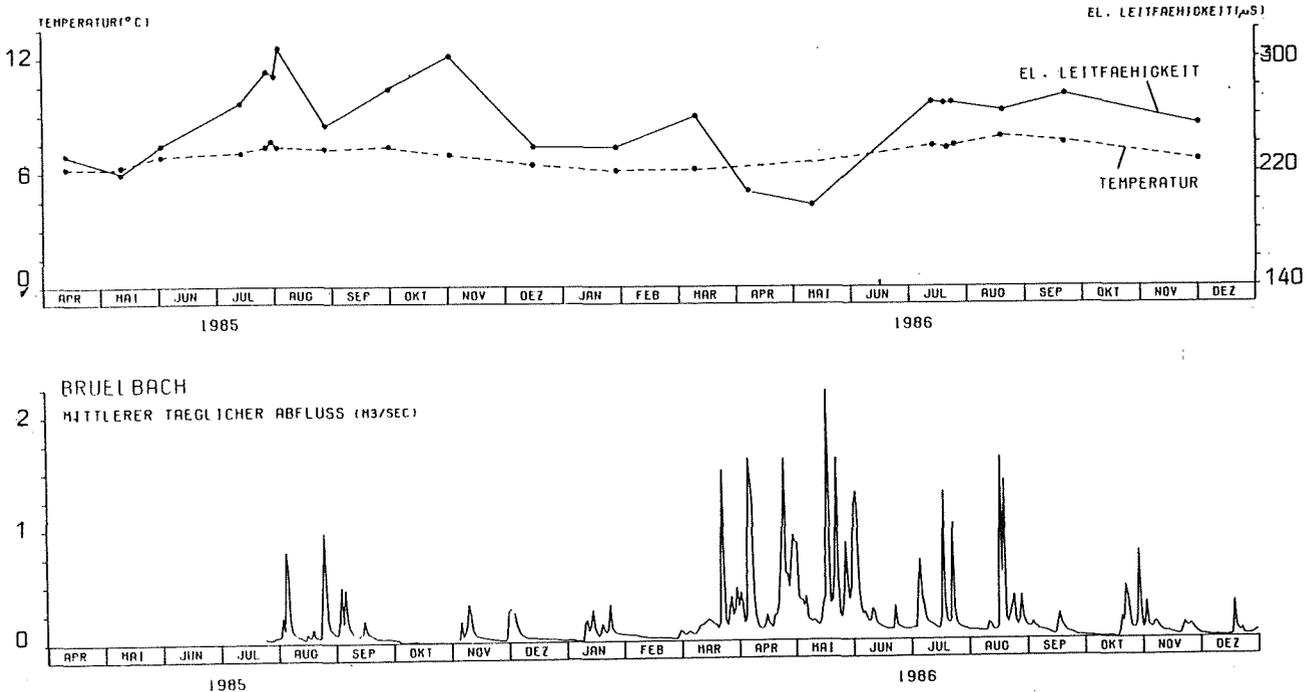


Abb. 9.9: Ganglinien von Abflussmenge, Temperatur und Leitfähigkeit, Pfannenstiel-Brülisau und Brüelbach

Im Gegensatz zur Tschuderquelle und den Quellen in Alt St. Johann liegt das Temperatur-Minimum im Winter und das Maximum im Spätsommer. Dies kann einerseits auf eine Beeinflussung durch den See, andererseits auf das tiefliegende Einzugsgebiet mit entsprechend anderen Schneeschmelzverhältnissen zurückgeführt werden. Der starke Abfall der Leitfähigkeit während der Schneeschmelze zeigt auch bei dieser Quelle eine bedeutende Direktabflusskomponente.

Quellen in Alt St. Johann

Bezüglich Hydrochemie zeigen die Quellen im Bereich Chessi bis Kirche Alt St. Johann gut übereinstimmende Werte. Sie werden hier deshalb summarisch behandelt.

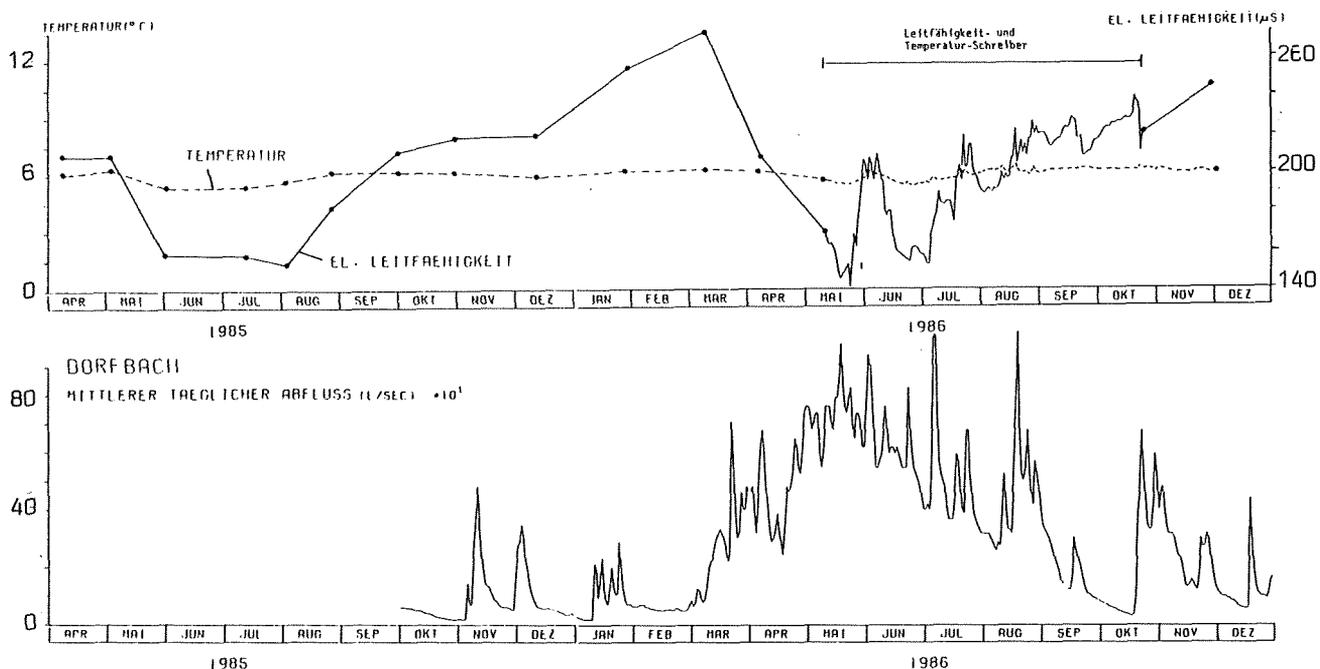


Abb. 9.10: Ganglinien von Schüttung, Temperatur und Leitfähigkeit, Quellen in Alt St. Johann

Die Quellen weisen den gleichen Temperaturjahresgang auf wie die Tschuderquelle, allerdings ist die Schwankung etwas grösser (5.3-6.3 Grad C). Sehr gross hingegen sind die Schwankungen der Leitfähigkeit. Im Spätwinter kommt relativ stark mineralisiertes Wasser aus dem Speicher zum Abfluss. Die Direktabflusskomponente ist aber während der Schneeschmelze sehr hoch. Die starke Schwankung während der kontinuierlichen Aufzeichnung zeigt die schnelle Reaktion auf andere Inputverhältnisse.

Die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Tagesmittelwerte der Leitfähigkeit (vgl. Abb. 9.11) zeigt, dass die Werte der Mineralisation nicht einer einfachen statistischen Verteilung angehören. BAKALOWICZ (1976:49) hat für verschiedene Quellen ähnliche zweigipflige Verteilungen nachgewiesen. Er führt dies auf den Abfluss von stärker mineralisiertem Reservoirwasser (höhere Leitfähigkeit) und eine Direktabflusskomponente (tiefere Leitfähigkeit) zu-

rück, weist aber auch darauf hin, dass diese Interpretation nicht ohne weiteres auf andere Karstsysteme übertragen werden darf. Die wechselnde Mineralisation kann auch auf wechselnde Zuflussverhältnisse hindeuten. Wasser aus dem nackten Karst dürfte im allgemeinen geringer mineralisiert sein als Wasser, das eine Bodendecke perkolliert hat.

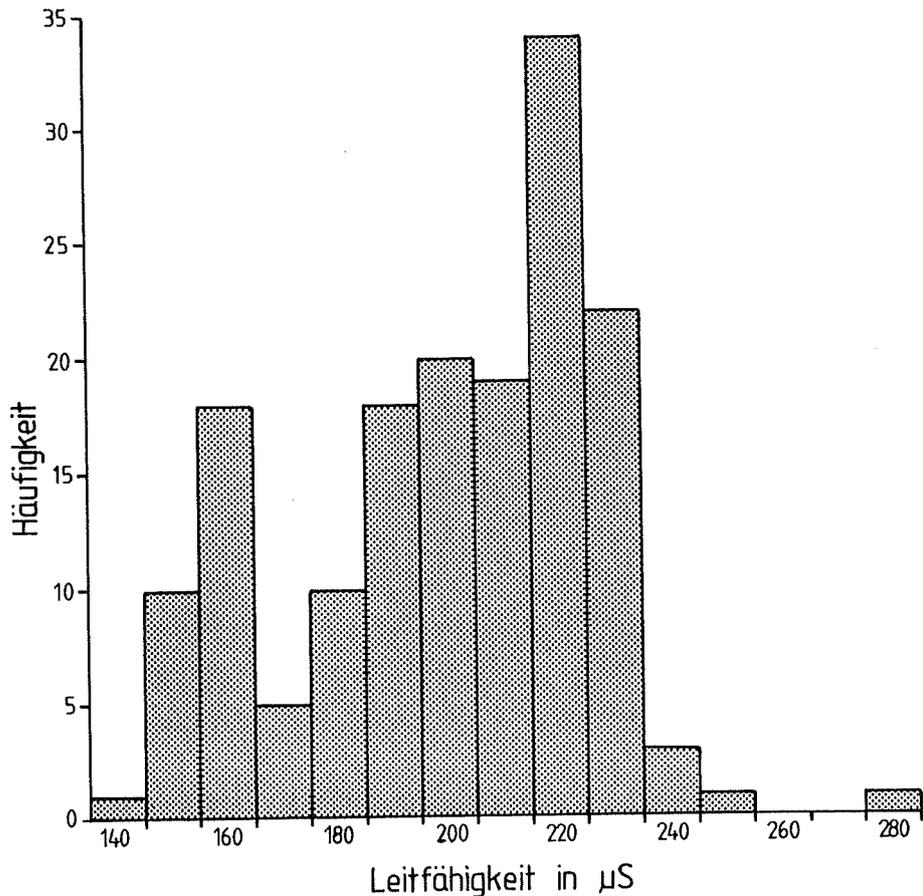


Abb. 9.11: Häufigkeitsverteilung der Leitfähigkeit, Quellen in Alt St. Johann

9.2.2 Statistische Analyse der Beziehung Schüttung-Wasserbeschaffenheit

Zur Untersuchung der Beziehung zwischen Quellschüttung und Wasserbeschaffenheit stehen die Daten von fünf Quellen zur Verfügung. Dabei liegen zwischen 12 und 18 Beobachtungen vor. Tabelle 9.2 zeigt die berechneten Korrelationen der Parameter zur Schüttung. Nur die Parameter Leitfähigkeit, Karbonathärte, Gesamthärte, Calcium weisen hohe Korrelationskoeffizienten auf (ausser Pfannenstiel-Brülisau). Diese vier Parameter sind untereinander hoch korreliert, die

Korrelationskoeffizienten liegen über 0.9 meist über 0.98. Für die weiteren Berechnungen ist aus dieser Gruppe von Parametern nur die Gesamthärte berücksichtigt worden. In Anbetracht der relativ wenigen Beobachtungen drängte sich diese Reduktion auf, um eine Berechnung zu ermöglichen.

Tab. 9.2: Korrelation der Wasserbeschaffenheit zur Schüttung

	Schüttung				
	Quellen in Alt St.Joh.	Gätterl-Wasserauen	Tschuder-Wasserauen	Pfannenst. Brülisau	Mühlebach-Sennwald
Temperatur	-0.48	0.34	-0.56	0.30	-0.04
Leitfähigkeit	-0.77	-0.57	-0.56	-0.19	-0.72
Karbonathärte	-0.77	-0.80	-0.51	0.12	-0.71
Chlorid	0.02	0.39	-0.29	0.27	0.36
Gesamthärte	-0.78	-0.77	-0.54	0.08	-0.69
Calcium	-0.71	-0.69	-0.51	0.12	-0.69
Sulfat	-0.76	-0.30	-0.48	-0.48	-0.64
Nitrat	0.02	0.30	0.05	-0.09	0.02

Für die fünf Quellen sind die partiellen Korrelationskoeffizienten der verbleibenden fünf Parameter zur Schüttung bestimmt worden. Mit einer partiellen Korrelationsanalyse kann ermittelt werden, in welchem Masse eine Variable mit einer anderen zusammenhängt, wenn man den Einfluss eines oder mehrerer weiterer, bei der einfachen Korrelation implizit eingehender Faktoren ausschaltet (BAHRENBERG, GIESE 1975: 184). Interessant sind die partiellen Korrelationskoeffizienten, die grösser sind als die einfachen in Tabelle 9.2. Sie zeigen eine erhöhte Korrelation mit der Schüttung an, wenn man den Einfluss der anderen Variablen eliminiert. Dies ist nur beim Nitrat und Chlorid bei den Quellen in Alt St. Johann und beim Nitrat des Tschuders-Wasserauen der Fall.

Es kann vorkommen, dass eine Korrelation zwischen zwei Variablen nur auf einer gemeinsamen Beeinflussung durch eine dritte Variable beruht. In solchen Fällen liegt der partielle Korrelationskoeffizient nahe bei 0 (BAHRENBERG, GIESE 1975: 186). Dieser Fall liegt offensichtlich bei den Quellen Tschuder, Pfannenstiel und Mühlebach vor. Die Werte in Tabelle 9.3 sind alle recht tief. Eine partielle Korrelation zur Schüttung ist nicht vorhanden.

Tab. 9.3: Partielle Korrelation der Wasserbeschaffenheit zur Schüttung

	Schüttung				
	Quellen in Alt St.Joh.	Gätteri-Wasserauen	Tschuder-Wasserauen	Pfannenst.-Brülisau	Mühlebach-Sennwald
Temperatur	0.59	-0.12	-0.43	0.02	-0.08
Chlorid	-0.59	0.52	-0.29	0.19	0.34
Gesamthärte	-0.84	-0.78	-0.08	0.16	-0.00
Sulfat	-0.55	0.24	-0.01	-0.47	-0.27
Nitrat	0.77	0.17	0.44	0.13	0.13

In Einklang mit dieser Aussage steht das Ergebnis einer multiplen Regression mit dem Modell:

$$\text{Schüttung} = \text{Konstante} + x_1 * \text{Temperatur} + x_2 * \text{Chlorid} + x_3 * \text{Gesamthärte} + x_4 * \text{Sulfat} + x_5 * \text{Nitrat}$$

Eine multiple Regression untersucht die Frage, in welchem Masse eine Variable (hier Schüttung) zugleich mit mehreren anderen Variablen zusammenhängt (BAHRENBURG, GIESE 1975: 187). Das Quadrat des multiplen Korrelationskoeffizienten entspricht dem durch das jeweilige Modell erklärten Varianzanteil. Die Werte in Tabelle 9.4 zeigen, dass nur für die Quellen Gätteri und in Alt St. Johann mit diesem einfachen Modellansatz ein befriedigendes Resultat erreicht werden kann.

Tab. 9.4: Erklärter Varianzanteil eines multiplen Regressionsmodells

Erklärter Varianzanteil in %	
Dorfbach-Alt St. Johann	89
Gätteri-Wasserauen	76
Tschuder-Wasserauen	51
Pfannenstiel-Brülisau	38
Mühlebach-Sennwald	57

Diese Resultate belegen für die Quellen in Alt St. Johann und Gätteri einen recht engen Zusammenhang zwischen Wasserbeschaffenheit und Abflussmenge. Es kann aber nicht

daraus geschlossen werden, dass kein oder nur ein geringer Zusammenhang zwischen Schüttung und Wasserbeschaffenheit bei den anderen drei Quellen vorhanden ist. In den Berechnungen ist nur die Schüttungsmenge berücksichtigt worden. Untersuchungen im Karst des Neuenburger Jura (KIRALY, MUELLER 1979, in: WEXSTEEN 1986: 11) zeigten, dass im Ablauf von Hochwasserwellen eine Veränderung der Mineralisation vor sich geht, die auf den sich verändernden Speisungsmechanismen beruht. Dies kann bei gleicher Schüttungsmenge zu unterschiedlicher Mineralisation führen. In diesen Untersuchungen ergaben sich 5 Phasen (WEXSTEEN 1986: 11):

- Auslauf vor einem Anstieg, Entleerung der wenig durchlässigen Blöcke, Mineralisation und Schüttung variieren wenig;
- ansteigende Hochwasserwelle, Auspressung von Reservoirwasser durch infiltrierendes "Frisch"-wasser (Piston-Effekt), geringe Schwankung der Mineralisation, oft leichter Anstieg;
- infiltrierendes Regenwasser erreicht die Quelle, plötzlicher Abfall der Mineralisation wegen der Verdünnung;
- während dem raschen Schüttungsabfall entleert sich das Hauptwassersystem, die Mineralisation steigt zuerst rasch an;
- Auslauf der Hochwasserwelle, die Mineralisation stabilisiert sich wieder.

Diese Resultate sind auf Grund intensiver Messungen an der Areuse-Quelle (Neuenburger Jura) gewonnen worden. Der Mechanismus dürfte in ähnlicher Weise aber auch bei den Karstquellen des Alpsteins spielen. Auf Grund der schmalen Datenbasis ist aber eine solche weitergehende Analyse nicht möglich. Beim stark von der Schneeschmelze geprägten Regime des Alpsteins, müsste auch die Lage in der Regimekurve, d.h. die Jahreszeit berücksichtigt werden.

9.3. Isotopenuntersuchungen

Am Physikalischen Institut der Universität Bern (Abt. LLC) sind einige Uebersichtsmessungen von Tritium zur Abschätzung der Verweildauer des Wassers gemacht worden. Es handelt sich bei den gemessenen Proben (Gätteriwasserauen, Tschuder-Wasserauen, Mühlebach-Sennwald, Quellen in Alt St. Johann, Pfannenstiel-Brülisau)

durchwegs um junge Wässer (1,5 bis 2 Jahre). Einzig das Wasser der Pfannenstielquelle scheint ein leicht höheres mittleres Alter aufzuweisen. Weitere aufwendige Tritiummessungen lohnten sich nicht, da mit einer Verfälschung der Werte durch den Austoss einer Fabrik in Teufen gerechnet werden muss.

Bei den obigen Quellen und fünf weiteren ist auch $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ gemessen worden. Die Werte für $\delta^{18}\text{O}$ liegen zwischen 11,9 und 13,63 ‰. Interessant ist der Gehalt von $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ insbesondere wegen seiner Höhenabhängigkeit. Die Differenzen sind aber unter Berücksichtigung des Messfehlers zu klein, um gesicherte Aussagen über mittlere Einzugsgebietshöhen zu machen (mündl. Mitt. U. Schotterer). Deshalb ist auch auf ein umfassendes Messprogramm von $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ verzichtet worden.

10. EINSATZ KUENSTLICHER TRACER 1986

Im Rahmen des Projekts kommt den Markierversuchen eine herausragende Bedeutung zu. Eine erste Serie konnte im Sommer 1986 durchgeführt werden. Eine zweite Serie fand 1987 statt. In Anbetracht der Grösse des Untersuchungsgebietes entschlossen wir uns zu einer räumlichen Zweiteilung der Einspeisungsstellen:

- 1986 Appenzellerseite
- 1987 Toggenburgerseite

In der Gesamtschau kann gesagt werden, dass die Markierversuche erfolgreich abgelaufen sind. Die Einspeisungen konnten unter guten Bedingungen durchgeführt werden. Bei der Probenahme ergaben sich keine grösseren Probleme und jeder Markierstoff konnte zu einem guten Teil wiedergefunden werden.

Im Folgenden sind die Einspeisungen zusammengestellt und die einzelnen Durchgänge kommentiert und dargestellt. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Kennwerte der Tracerdurchgangskurven und eine Interpretation der gesamten Ergebnisse finden sich in Kapitel 12.

10.1. Hydrometeorologische Bedingungen

Die Einspeisungen vom 1. Juli 1986 fielen in die schöne, trockene Periode vom 25. Juni bis 2. Juli. Die Abflussmengen waren aber wegen der anhaltenden Schneeschmelze noch relativ hoch. Der kurze Gewitterregen vom 3. Juli, der insbesondere im Gebiet Seealp/Ebenalp (Niederschlagsmenge beim Spitzigstein 41 mm) recht heftig war, verursachte keine wesentliche Aenderung. Erst der Regen vom 6. Juli brachte ein Hochwasser. Zu diesem Zeitpunkt waren aber die Hauptdurchgänge der vorher durchgeführten Einspeisungen bereits vorbei.

Nach einigen regnerischen Tagen setzte wieder schönes Wetter ein und die Abflussmengen fielen bis am 17. Juli stark ab, da die Schneeschmelze nachliess. In dieser Periode konnte die Einspeisung Reslen (Seealp) durchgeführt werden. Am 18. und 19. Juli waren wiederum 2 Regentage zu

verzeichnen. Darauf konnte am 22. Juli auch die letzte Einspeisung im Seealpsee durchgeführt werden.

Der Gewitterregen vom 23. und die Niederschläge vom 24. Juli führten schliesslich zum grössten Hochwasser dieses Sommers, das von einer trockenen Periode bis zum 12. August gefolgt wurde.

Im ganzen gesehen waren damit die hydrometeorologischen Bedingungen für die Markierversuche recht günstig, die meisten Hauptdurchgänge der Tracer fielen in Perioden ohne allzu grosse Abflussschwankungen, die eine Auswertung oft erschweren.

10.2 Einspeisungen

Im Sommer 1986 sind im Untersuchungsgebiet sechs Einspeisungen von künstlichen, fluoreszierenden Markierstoffen vorgenommen worden. Der Einspeisezeitpunkt anfang Juli sollte gewährleisten, dass die Eingabestellen schneefrei sind und eine genügende Wasserführung aufweisen. Dank den automatischen Probenahmegeräten konnte, trotz der zu erwartenden hohen Fliessgeschwindigkeiten bei den herrschenden hydrologischen Bedingungen, eine genügende Beprobungsfrequenz sichergestellt werden. Um vergleichbare Resultate zu erhalten und um die Probenahme zu vereinfachen, war eine möglichst simultane Einspeisung vorgesehen. Tabelle 10.1 zeigt einen Ueberblick der wichtigsten Einspeisedaten.

Tab. 10.1: Einspeisungen 1986 im Alpsteingebiet

Ort	Datum Zeit	Tracer Menge	Art der Einspeisestelle
Schwaderloch 753800/238950	1.7.86 8.50-55	1 kg Uranin in 10 l Wasser	Schwinde im Seewerkalk, 2 l/s
Ebenalp 749250/238850	1.7.86 8.53-9.07	10 kg Eosin in 60 l Wasser	Abwasserversickerung im Seewerkalk, inkl. Nachspülung 170 l, ca. 450 m ³ /Jahr

Oehrligrueb 745250/236500	1.7.86 12.00-09	15 kg Uranin in 100 l Wasser	Schwinde im Schrattenkalk, 20 l/s
Fälensee 750200/235560	4.7.86 12.20-50	8 kg Rhodamin in 120 l Wasser	Seeschwinde im Schrattenkalk, ca. 200 l/s
Reslen 748650/237350	16.7.86 9.15-30	20 kg Naphthionat in 200 l Wasser	Schwinde im Seewerkalk, 20 l/s
Seealpsee 748700/237250	22.7.86 10.50	20 g Rhodamin	Seeschwinde im Seewerkalk, 10m Tiefe, 70 l/s

Die Einspeisemengen sind auf Grund der Erfahrungen in anderen Versuchen und im Hinblick auf die Einmaligkeit solcher Grossversuche grosszügig bemessen worden, um allenfalls auch hydrologische Verbindungen von untergeordneter Bedeutung nachweisen zu können.

Am 1.7.1986 konnte unter optimalen Bedingungen im Schwaderloch und in der Oehrligrueb eingespiessen werden. Der vorgelöste Tracer konnte direkt in die Schwinden eingegeben werden. Die Vorfluter sorgten für eine genügende Vor- und Nachspülung.

Auf der Ebenalp stand nur eine geringe Wassermenge (170 l) zur Verfügung. Wie die Resultate zeigten, war sie bei den herrschenden hydrologischen Bedingungen ausreichend. Der vorgelöste Tracer und das Spülwasser wurden mit einem Schlauch direkt in den Ueberlauf der Klärgrube eingegeben, wo rund 400-450 m³ Abwasser pro Jahr ausfliessen.

Der hohe Seestand beim Fälensee erforderte einen unvorhergesehenen Taucheinsatz von Th. Reutimann, damit der Markierstoff mit einem Schlauch sauber in den subaquatischen Abfluss auf 4m Tiefe eingegeben werden konnte. Th. Reutimann fixierte an der Abflussstelle unter Wasser einen Schlauch, über den der gelöste Tracer ohne Kontamination des Sees eingegeben wurde. Die Einspeisung erfolgte am 4.7.1986.

Die Einspeisung unterhalb des Seealpsees (Schwinden bei Reslen) konnte, wie zu erwarten war, erst etwas später durchgeführt werden. Es musste abgewartet werden, bis der Schwendebach zwischen Reslen und den Gätteriquellen trocken war. Sonst wäre der Nachweis, ob die Verbindung direkt oberirdisch oder über das Karstwassersystem besteht, nicht möglich gewesen. Unter einwandfreien Verhältnissen konnte das vorgelöste Naphthionat dann am 16. Juli direkt in eine der zahlreichen kleinen Schwinden eingegeben werden. Der Vorfluter stellte eine ausreichende Vor- und Nachspülung sicher.

Während seinen Untersuchungen im Seealpsee entdeckte Th. Reutimann im Seewerkalkriegel am Nordufer des Seealpsees eine subaquatische Schwinde auf 10 m Tiefe. Kurzfristig wurde darauf eine zusätzliche Einspeisung einer geringen Tracermenge angesetzt, um den als wahrscheinlich betrachteten Zusammenhang zu den Gätteriquellen zu untersuchen. Das in 2 Literflaschen vorgelöste Rhodamin wurde vom Taucher direkt in die Schwinde eingegeben.

10.3. Probenahme

10.3.1 Automatische Probenahmegeräte

Für die Markierversuche standen sieben Geräte im Einsatz. Ausser dem Probenahmegerät am Berndlibach sind alle Geräte vorgängig zu den Einspeisungen installiert und in Betrieb gesetzt worden. Das Gerät am Berndlibach ist am Tag nach der Einspeisung auf Grund des raschen Durchganges installiert worden. Ursprünglich waren hier nur zwei Direktproben pro Tag vorgesehen. Die Abbildung 10.1 zeigt die Intervalle der Geräte während des Versuchs.

Auf Grund der provisorischen Resultate im Feldlabor sind vier der sieben Geräte Ende Juli demontiert worden. Die restlichen sind am 21. August eingezogen worden. Die definitiven Resultate zeigen, dass dieser frühe Abbruch der Beprobung gerechtfertigt war. In der gesamten Zeitspanne waren nur 3 Ausfälle von Probenahmegeräten zu verzeichnen:

Mühlebachquelle:	9.7.-11.7.,	verstopftes Ventil
Gätterli	: ab 23.7.,	überschwemmte Fassung
Brüelbach	: ab 8.8.,	Beschädigung

Die Ausfälle brachten aber keinen grossen Verlust hinsichtlich der Hauptdurchgänge der Markierstoffe. Insgesamt sind rund 1600 Direktproben entnommen und analysiert worden.

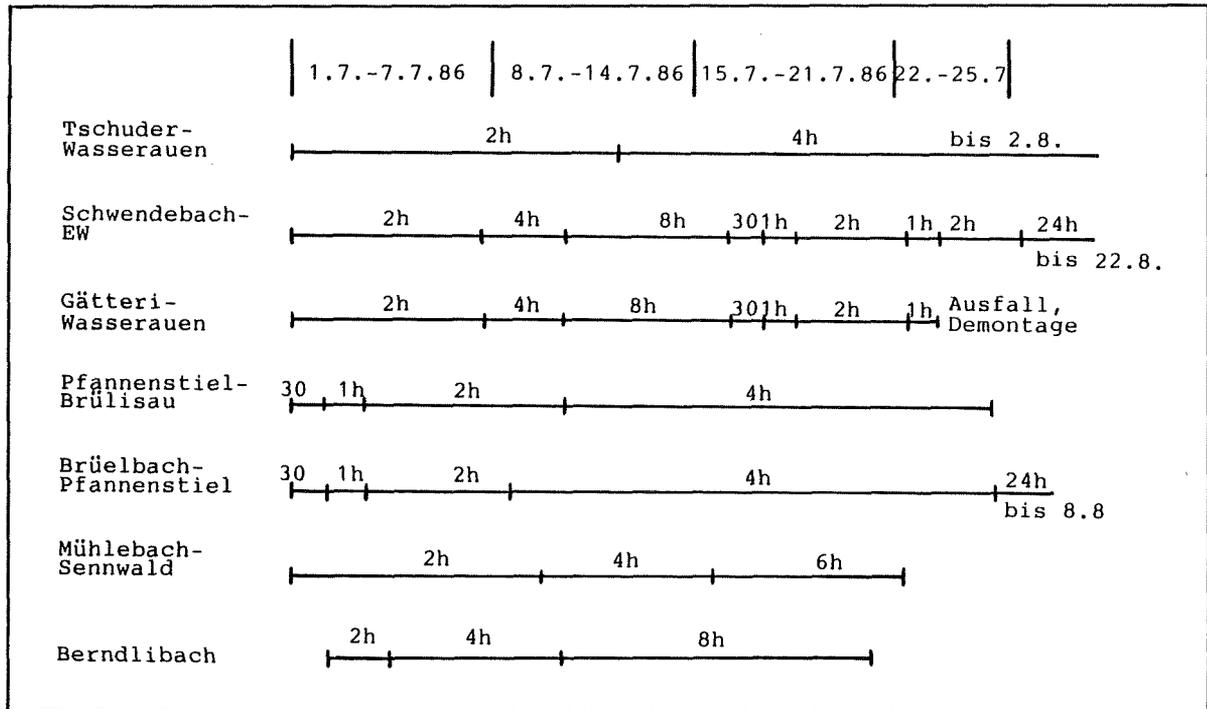


Abb. 10.1: Probenahmeintervall der automatischen Probenahmegeräte 1986

10.3.2 Aktivkohleproben

Aktivkohlesäckchen sind an 34 Stellen exponiert worden (siehe Hydrogeographische Karte, Beilage). In der Regel betrug die Einhängzeit 1 Woche, ab Ende Juli länger. Für die Blindproben wurde bereits vor der Einspeisung eine Serie eingehängt und wieder entfernt. Ausser beim Grundwasserpumpwerk in Wasserauen wurde die Beprobung Mitte bis Ende August eingestellt. Hier dauerte sie bis Anfang Dezember. Insgesamt sind 140 Säckchen eingehängt worden, drei waren nicht mehr auffindbar oder defekt.

10.3.3 Handproben

An 3 Stellen konnten Anwohner für eine regelmässige Probenahme gewonnen werden:

- Aescher : Fassung von Tropfwasser für Bergrestaurant
- Dunkelberndli : Berndliquelle
- Alpberg : Quelle bei Wasserauen

Zu Beginn sind 2x täglich, später 1x täglich Proben genommen worden.

Im weiteren sind zahlreiche Handproben bei Nebenausstritten von Quellen mit automatischen Probenahmegeräten, beim Wechseln der Aktivkohlesäckchen und bei weiteren Stellen im Gebiet Seealp, Rheintaler Sämtis, im Brüeltobel, auf der Seite Lehmen und im Rheintal genommen worden. Ihre Zahl beläuft sich auf ca. 500.

10.4. Resultate

10.4.1 Einspeisung Schwaderloch (Abb. 10.2,3)

Das im Schwaderloch eingespeiste Uranin konnte nur in der Pfannenstielquelle wiedergefunden werden. Proben sind hier mittels automatischen Probenehmern in der Quellfassung der Wasserkorporation Rüte und im Brüelbach beim Linnigraphen entnommen worden. Dies erlaubte die Berechnung der Ausbringrate, da das Quellwasser während des Versuchs nicht ins Netz eingespeist, sondern in den Bach abgeleitet wurde. Der kompakte Durchgang erschwert die genaue Berechnung etwas, die Ausbringrate liegt aber nahe bei 100%.

Bei den Proben im Brüelbach beim Schluchtausgang konnte erstaunlicherweise nie Uranin nachgewiesen werden, obwohl bis Ende Juli mindestens alle drei Tage Proben entnommen wurden. Hingegen war der Tracer auch im Hochwasserüberlauf direkt oberhalb der Fassung und beim kleinen Quellaustritt auf der rechten Bachseite am Schluchtausgang nachzuweisen. Die gemessenen Konzentrationen entsprechen jenen in der Fassung.

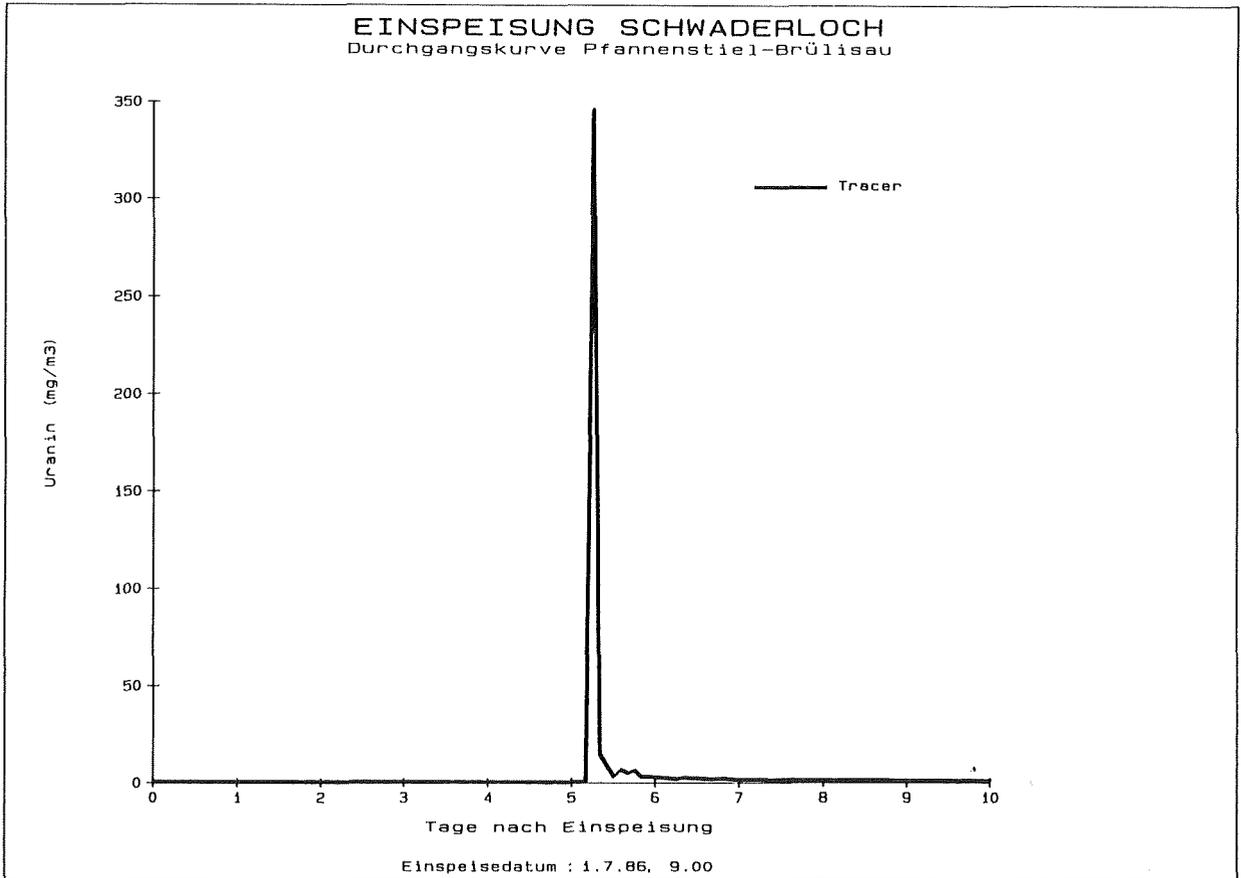


Abb. 10.2: Einspeisung Schwaderloch, Durchgangskurve Pfannenstiel-Brüdisau

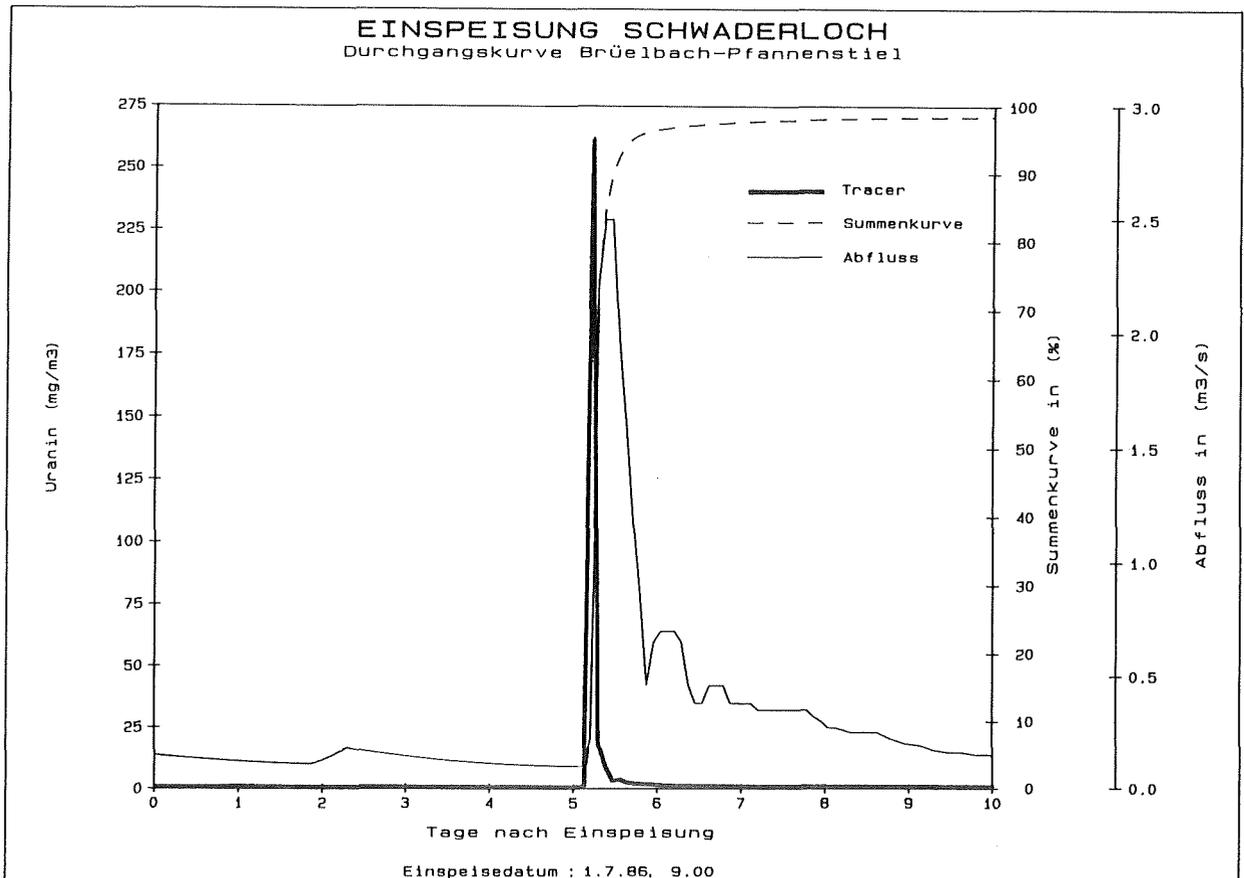


Abb. 10.3: Einspeisung Schwaderloch, Durchgangskurve Brüelbach-Pfannenstiel

Auch die Markierversuche von ARBENZ (1923, vgl. Kap 10.5) zeigten, dass die Quellen im Brüeltobel und im Pfannenstiel offensichtlich unterschiedlichen hydrologischen Systemen angehören. Auch ihre geologische Lage ist unterschiedlich. Die Pfannenstielquelle liegt im Seewerkalk des NW-Schenkels des Alpsigel-Gewölbes, die Austritte in der Schlucht dagegen liegen im Kern des Gewölbes, das durch das Brüeltobel klusartig aufgeschlossen ist.

Die Art des Farbdurchganges fällt aus dem Rahmen der übrigen Durchgänge. Die Abbildungen 10.2 und 10.3 zeigen den ausserordentlich kompakten Durchgang, einerseits in der Fassung der Pfannenstielquelle und andererseits im Brüelbach, in den das Quellwasser abgeleitet wird. Erste Farbspuren konnten erst 60 Stunden nach der Einspeisung nachgewiesen werden, was eine ausserordentlich geringe maximale Abstandsgeschwindigkeit von 12 m/h ergibt.

Dies deckt sich mit dem höheren Alter des Quellwassers im Vergleich mit anderen Quellen (Ergebnisse von Tritiummessungen). Der geringe Dispersionskoeffizient kann durch die Hochwassersituation während des Tracerdurchgangs erklärt werden. Durch die hohen Fliessgeschwindigkeiten in dieser Phase kam das markierte Wasservolumen in einem sehr kurzen Zeitraum zum Abfluss, die Durchgangskurve ist dadurch zusammengestaucht worden. Eine Elimination dieser Stauchung für eine vergleichbare Bestimmung der Parameter der Durchgangskurve ist unmöglich, da keine Daten über die Veränderung der Fliessgeschwindigkeiten vorliegen. Ueber-schlagsmässige Berechnungen zeigten aber, dass der Dispersionskoeffizient im Rahmen der anderen Durchgänge liegen dürfte. Wichtig ist die Tatsache, dass der erste Tracernachweis zwei Stunden vor dem Einsetzen des Schüttungsanstieges liegt. Die Verbindung Schwaderloch-Pfannenstiel ist also nicht erst durch das Hochwasserereignis hergestellt worden, dieses beschleunigte bloss den Durchgang.

Nach dem Maximum fällt die Konzentration rasch ab. Nach 10 Tagen beträgt sie in der Quellfassung noch 0.68 mg/m^3 , nach 24 Tagen noch 0.091 mg/m^3 , also rund 4000 x weniger als die Maximalkonzentration.

An anderen Stellen, insbesondere auch im Rheintal konnte kein Uranin nachgewiesen werden.

10.4.2 Einspeisung Fälensee (Abb. 10.4)

Bereits ARBENZ (1923) hatte 1921 einen gut dokumentierten Markierversuch am Fälensee vorgenommen. Die Hauptverbindung zur Quelle Mühlebach-Sennwald war daher bekannt. Es galt vor allem eventuell vorhandene Verbindungen von untergeordneter Bedeutung zu erkennen, insbesondere auch eine im Volksmund vermutete Verbindung zum Seealpsee. Deshalb wurde eine relativ grosse Einspeisemenge gewählt.

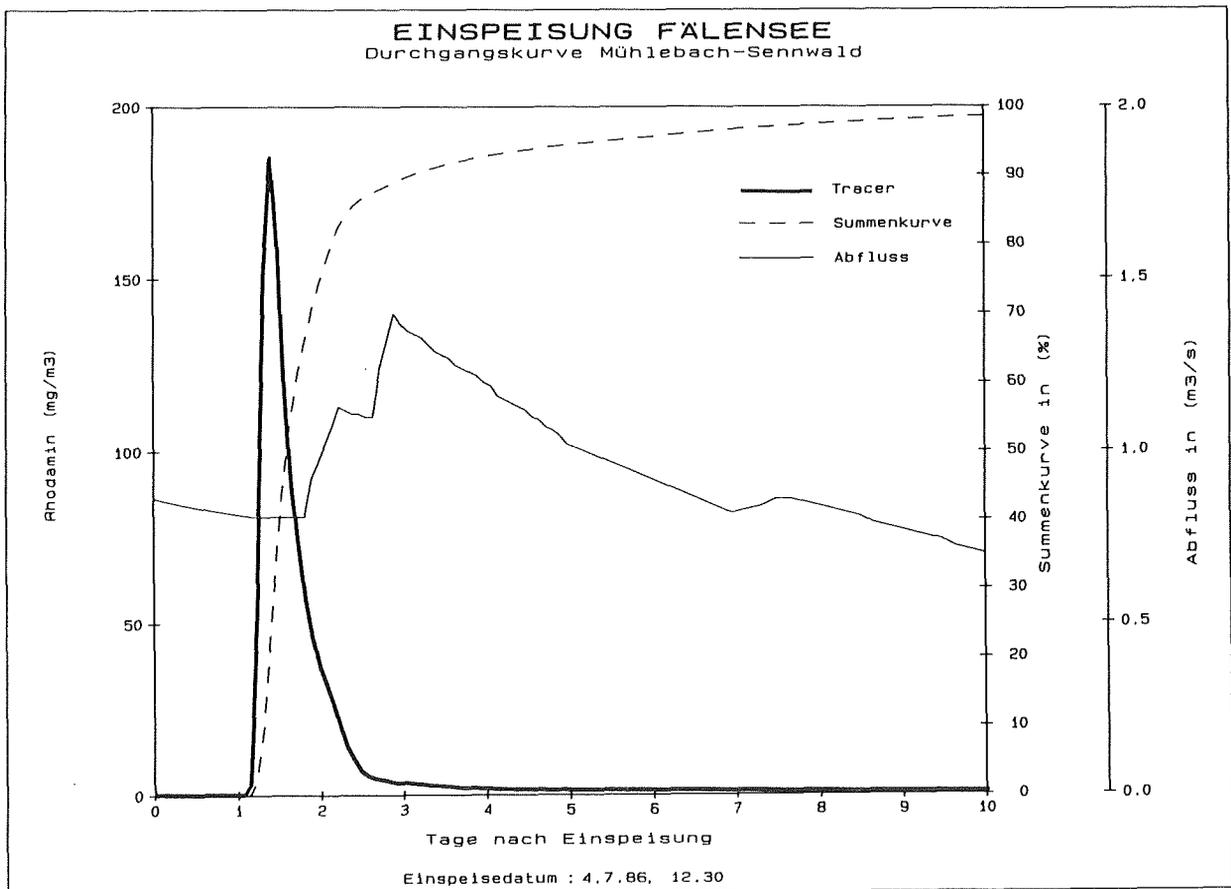


Abb. 10.4: Einspeisung Fälensee, Durchgangskurve Mühlebach-Sennwald

Der Hauptdurchgang setzte wie erwartet sehr rasch bei der Mühlebachquelle ein. Es konnte eine mittlere Abstandsgeschwindigkeit von 144 m/h ermittelt werden. Insgesamt wurden hier 7,6 kg der eingespeisten 8 kg Rhodamin ausgebracht. Dies ergibt eine Ausbringrate von 95%. Nach 15 Tagen war die Tracerkonzentration auf 0,14 mg/m³ abgesunken. Die Abflussmenge ist mittels einer Regressionsbeziehung

zur Säntisthur ermittelt worden, die an Hand von Einzelmessungen bestimmt worden ist.

Spuren von Rhodamin konnten auch im Bofelbach und in der Quellflur unterhalb der Strasse bei Läui nachgewiesen werden. Bei Läui kann es sich allerdings auch um wiederver-sickertes Wasser der Mühlebachquellen handeln. Der Nachweis weiter nordöstlich im Bofelbach ist interessant, weil er zeigt, dass die Querstörung, in der die Mühlebachquelle liegt, von einem Teil des Wassers durchflossen wird.

An sämtlichen anderen Stellen, die untersucht worden sind, konnte kein Rhodamin dieser Einspeisung nachgewiesen werden. Die vermutete Verbindung zum Seealpsee konnte also nicht nachgewiesen werden. Sie kann auf Grund der hohen Ausbringrate bei der Mühlebachquelle ausgeschlossen werden.

Kein Farbstoffnachweis ergab sich auch bei der Quelle der Alp Rheintaler Säntis und im Zufluss des Säntisersees.

10.4.3 Einspeisung Oehrligrueb (Abb. 10.5-7)

Bei der Einspeisung in der Oehrligrueb war eine Hypothese über die Abflussrichtung auf Grund der vorliegenden Kenntnisse nicht möglich. Die hohe Einspeisemenge sollte auf jeden Fall ein positives Ergebnis sicherstellen. Es konnte tatsächlich ein Abfliessen in zwei unterschiedliche Richtungen festgestellt werden. Es waren deutliche Durchgänge sowohl in den Berndlibachquellen als auch im Tschuder-Wasserauen nachweisbar.

Das Erstauftreten des Markierstoffes Uranin im Berndlibach ist leider nicht genau feststellbar, da zu Beginn kein automatischer Probenehmer installiert war, und nur 2x täglich eine Probe entnommen wurde. Da der Tracer nicht nur in den eigentlichen Berndliquellen sondern auch in einigen weiteren Quellen auftrat, wurde der Probenehmer am Bach weiter unten aufgestellt.

Es gelang so die Spitze des Durchgangs zu erfassen, das Erstauftreten muss auf Grund der gemessenen Durchgangskurve in den frühen Morgenstunden vom 2. Juli liegen. Die Ausbringrate kann so trotzdem mit einigermaßen guter Zuverlässigkeit ermittelt werden, da bei den herrschenden Witterungsbedingungen auch der Abfluss über die Zeitspanne des Hauptdurchganges gut erfasst werden konnte. Rund die

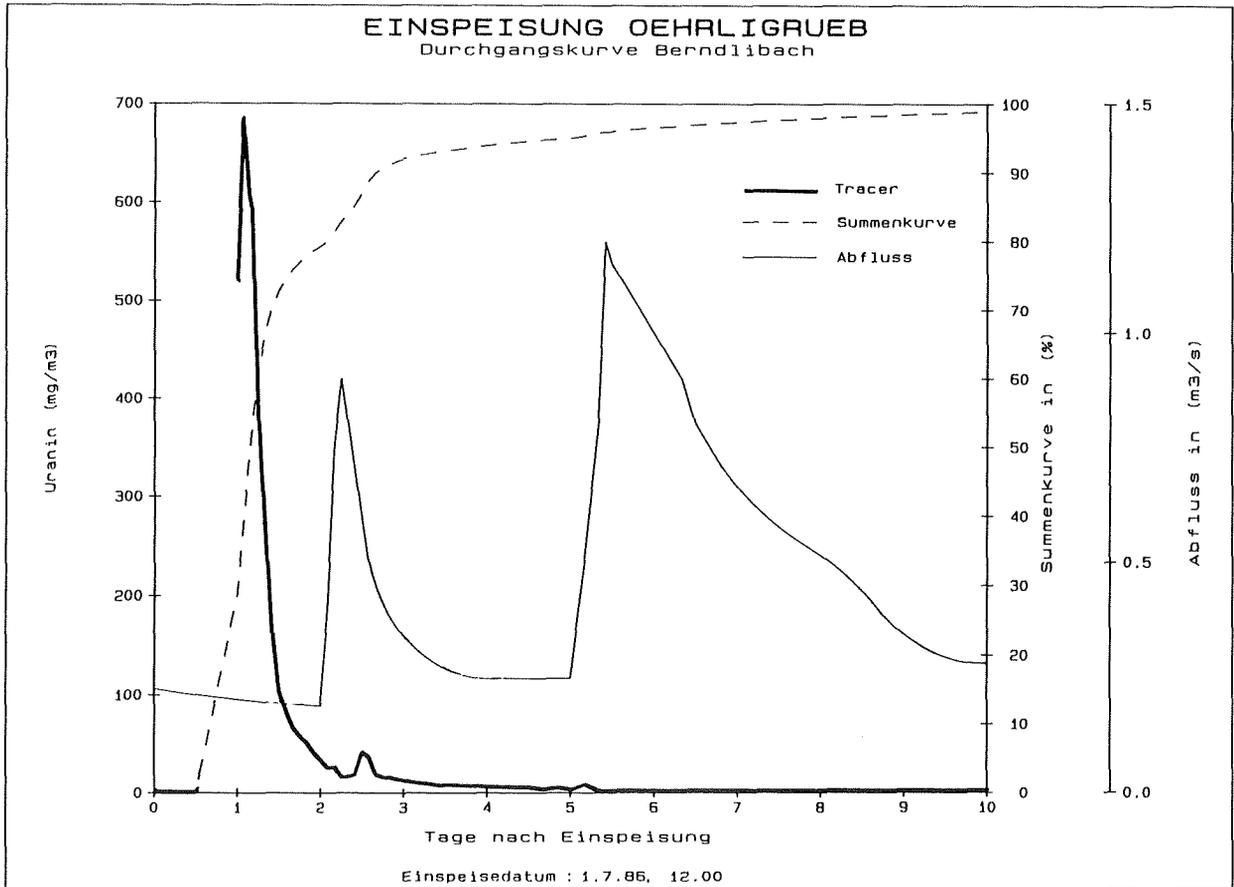


Abb. 10.5: Einspeisung Oehrligrueb, Durchgangskurve Berndlibach

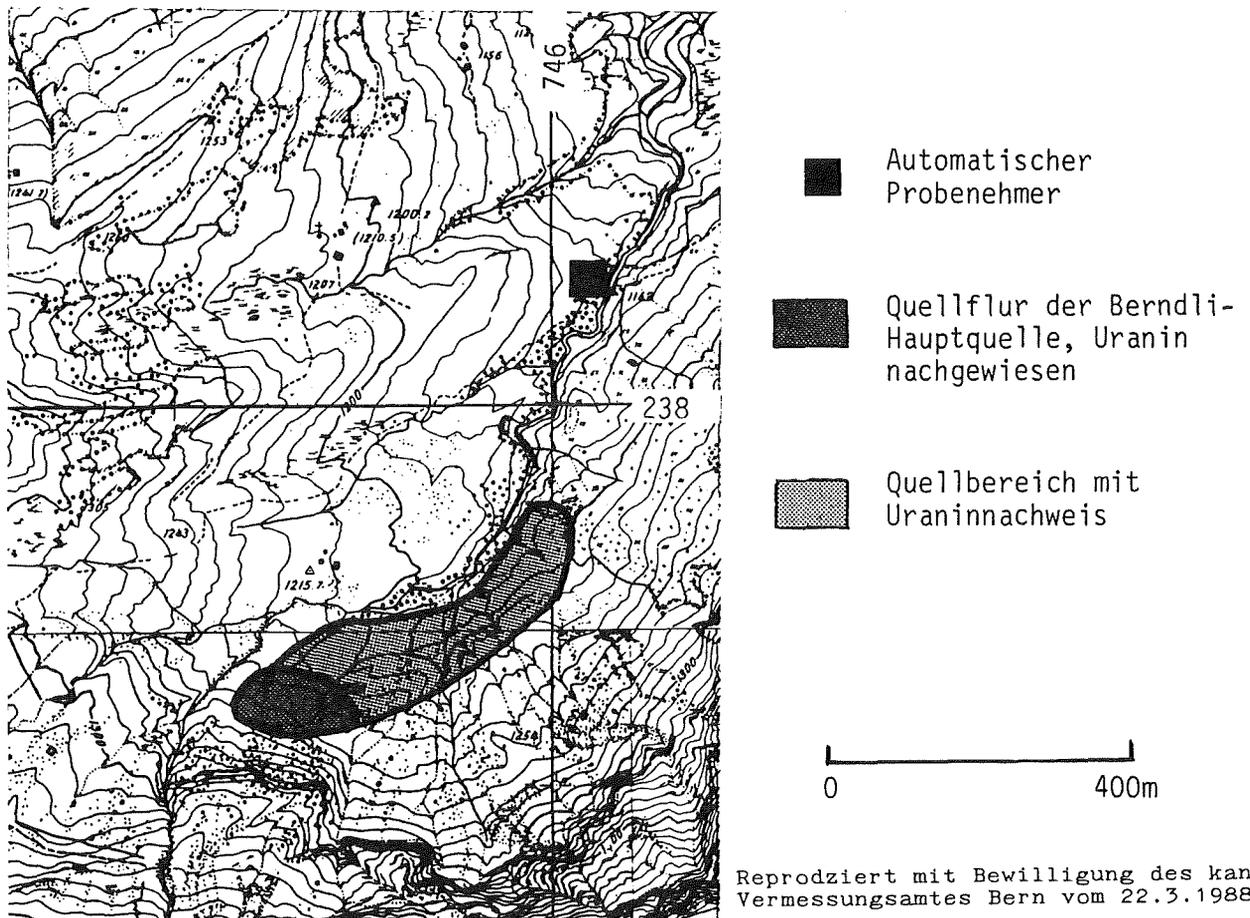


Abb. 10.6: Quellsituation Berndli

Hälfte des eingespeisten Uranins konnte hier wiedergefunden werden. Nach 17 Tagen betrug die Konzentration des Uranins beim automatischen Probenehmer noch $0,14 \text{ mg/m}^3$.

Die Abbildung 10.6 zeigt eine Detailaufnahme des Quellgebietes und der Austrittsstellen des Markierstoffes. Der Markierstoff konnte nicht nur in den als Berndliquellen bekannten Austritten nordöstlich einer kleinen Waldpartie nachgewiesen werden. Eine ganze Reihe Austritte weiter nordostwärts bis zum Waldrand wiesen ebenfalls Konzentrationen in derselben Grössenordnung wie die Hauptquelle auf. Kein Markierstoff wies der Bach westlich der Hauptquellen auf, ebenso nicht die Schmelzwasserbäche, die im ganzen Bereich von oben aus dem felsigen Nordwesthang zufließen.

Der Austrittsbereich zeigt sehr schön die Bindung des Quellhorizontes an die Ueberschiebung der Säntis-Decke auf die subalpine Molasse, die wenig südwestlich der Hauptquelle sogar aufgeschlossen ist. Diese Verbindung belegt auch die hydrologische Bedeutung der steilstehenden Klüfte quer zu den Faltenachsen, die im Nordwesthang (z.B. beim Abstieg bei den Nasenlöchern) sichtbar sind.

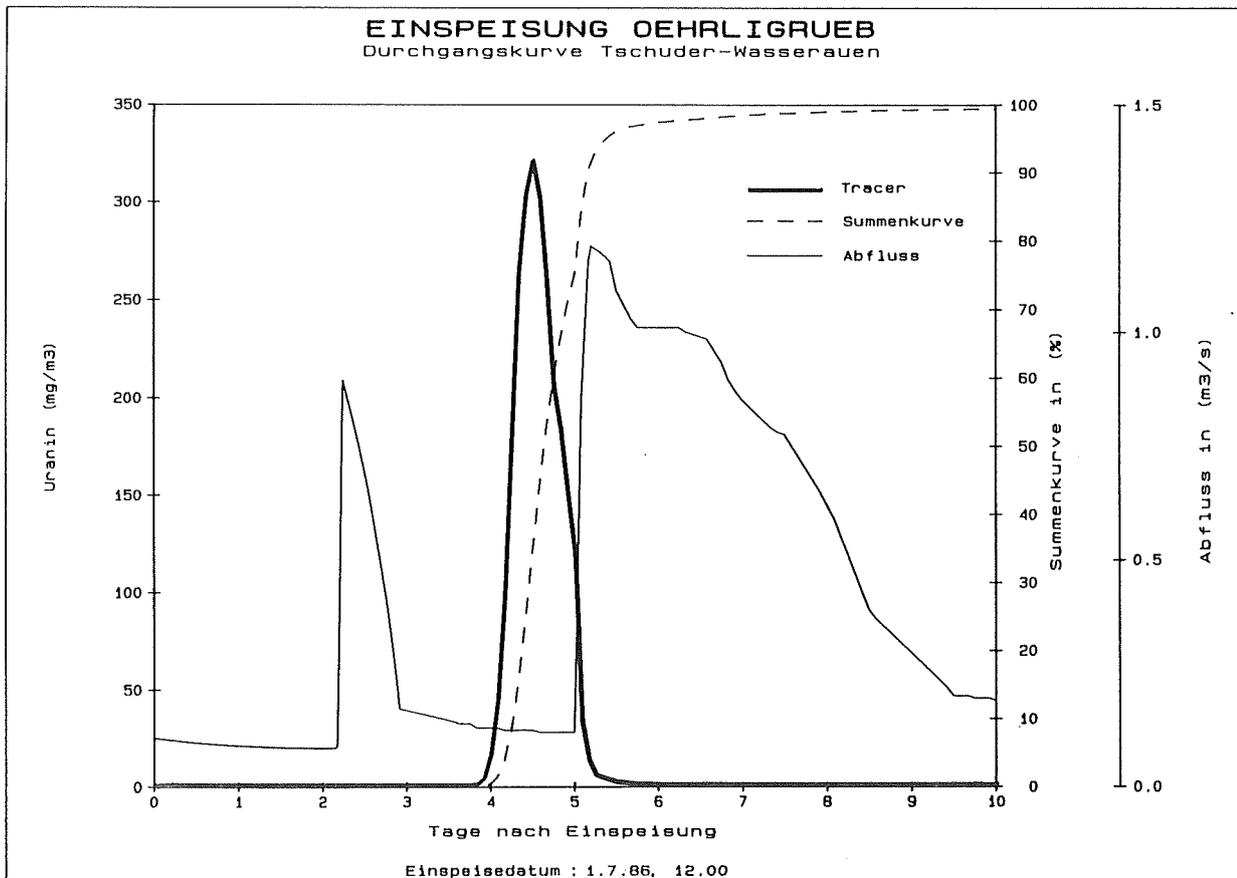


Abb. 10.7: Einspeisung Oehrligrueb, Durchgangskurve Tschuder-Wasserauen

Nach 90 Stunden konnte der Markierstoff auch im Tschuder bei Wasserauen nachgewiesen werden (Abb. 10.7). Die Fließgeschwindigkeiten sind relativ gering, die mittlere Abstandsgeschwindigkeit beträgt 55 m/h. Trotzdem war der Durchgang sehr kompakt (Dispersionskoeffizient $D_L=0,13$). Beim Tschuder sind weitere 19% des eingespeisten Markierstoffes ausgebracht worden. Auf die Hochwasseraustritte des Tschuders und anderer kleiner Quellen bei Wasserauen, wo ebenfalls Uranin nachgewiesen werden konnte, wird im folgenden Kapitel eingegangen. Nach 20 Tagen lag die Konzentration des Uranins im Tschuder nur noch bei $0,02 \text{ mg/m}^3$.

10.4.4 Einspeisung Ebenalp (Abb. 10.8)

Das Ergebnis der Einspeisung auf der Ebenalp zeigt, dass der Auslauf der Abwasserversickerung sehr rasch in das aktive Karstwassersystem gelangt und abfließt. Es war ins-

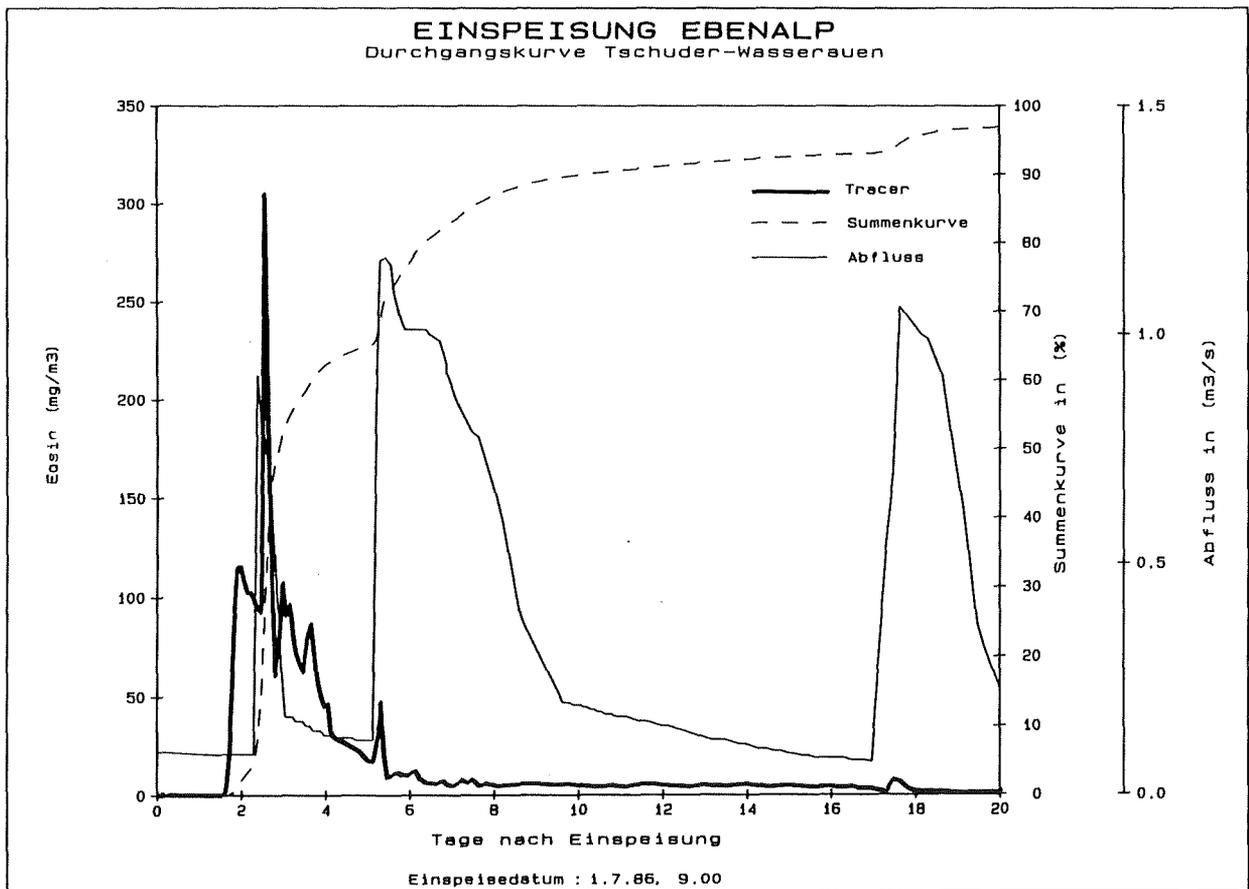


Abb. 10.8: Einspeisung Ebenalp, Durchgangskurve Tschuder-Wasserauen

besondere erstaunlich, dass trotz der geringen Wassermenge (170 l), die insgesamt eingespeist wurde, der Markierstoff bereits vor den ersten nachfolgenden Niederschlägen im Tschuder nachgewiesen werden konnte. Das zweite und höchste Maximum trat nach einem kurzen, heftigen Gewitterregen auf. Es folgen weitere, kleinere Nebenmaxima bis zum vierten Tag nach Einspeisung. Das Niederschlagsereignis rund 5 Tage nach Einspeisung hatte wiederum mehrere Spitzen abnehmender Grösse zur Folge. Dies deutet auf unterschiedliche Fliesswege verschiedener Durchlässigkeit hin. Die Spitzen 17 und 22 Tage nach Einspeisung treten auch in der Folge von Niederschlägen auf. 30 Tage nach Einspeisung betrug die Eosinkonzentration nur noch $0,7 \text{ mg/m}^3$.

Auf Grund der Analysen und der Abflussdaten konnte eine Ausbringrate des Tracers von rund 100% errechnet werden, auch dies ein Hinweis auf die direkte hydrologische Verbindung von der Ebenalp zum Tschuder.

Direktproben in der Umgebung des Tschuders zeigten, dass auch benachbarte Quellaustritte mit Uranin und Eosin markiert sind. Die untersuchten Stellen sind auf Abbildung 10.9 verzeichnet. Bei Austritten nordöstlich des Tschuders konnte kein Markierstoff nachgewiesen werden. Der mutmasslich durchziehende Sax-Schwendi-Bruch (vgl. Geol. Atlas der Schweiz) bildet hier offensichtlich eine hydrologische Grenze. Der Austritt im Geröll direkt unterhalb des Tschuders (oberhalb der Fischzucht) und der Austritt am Hangfuss 50 m weiter südwestlich weisen die gleichen Konzentrationen an Uranin und Eosin auf wie die Hauptquelle, allerdings mit geringer zeitlicher Verzögerung.

Bei den Austritten weiter südwestlich handelt es sich mit einer Ausnahme (Abb. 10.9, Nr. 11) um Hochwasseraustritte. Es liegen nur Proben aus dem Hochwasserereignis vom 7. Juli vor. Auf Grund der vorliegenden Werte kann deshalb nicht beurteilt werden, ob die Unterschiede in der Tracerkonzentration nur auf einer zeitlichen Verschiebung der Durchgänge beruhen. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 10.2 mit den entsprechenden Werten des Tschuders zusammengestellt.

Abb. 10.9:
UNTERSUCHTE WASSERAUSTRITTE BEI WASSERAUEN



AUSTRITTE MIT NACHWEIS VON URANIN
UND EOSIN



AUSTRITTE OHNE TRACERNACHWEIS
(URANIN, EOSIN, RHODAMIN,
NAPHTIONAT)

1-4 : kleine Quellaustritte

5 : Tschuder Hauptquelle

6,7 : tiefer liegende Austritte
des Tschuders

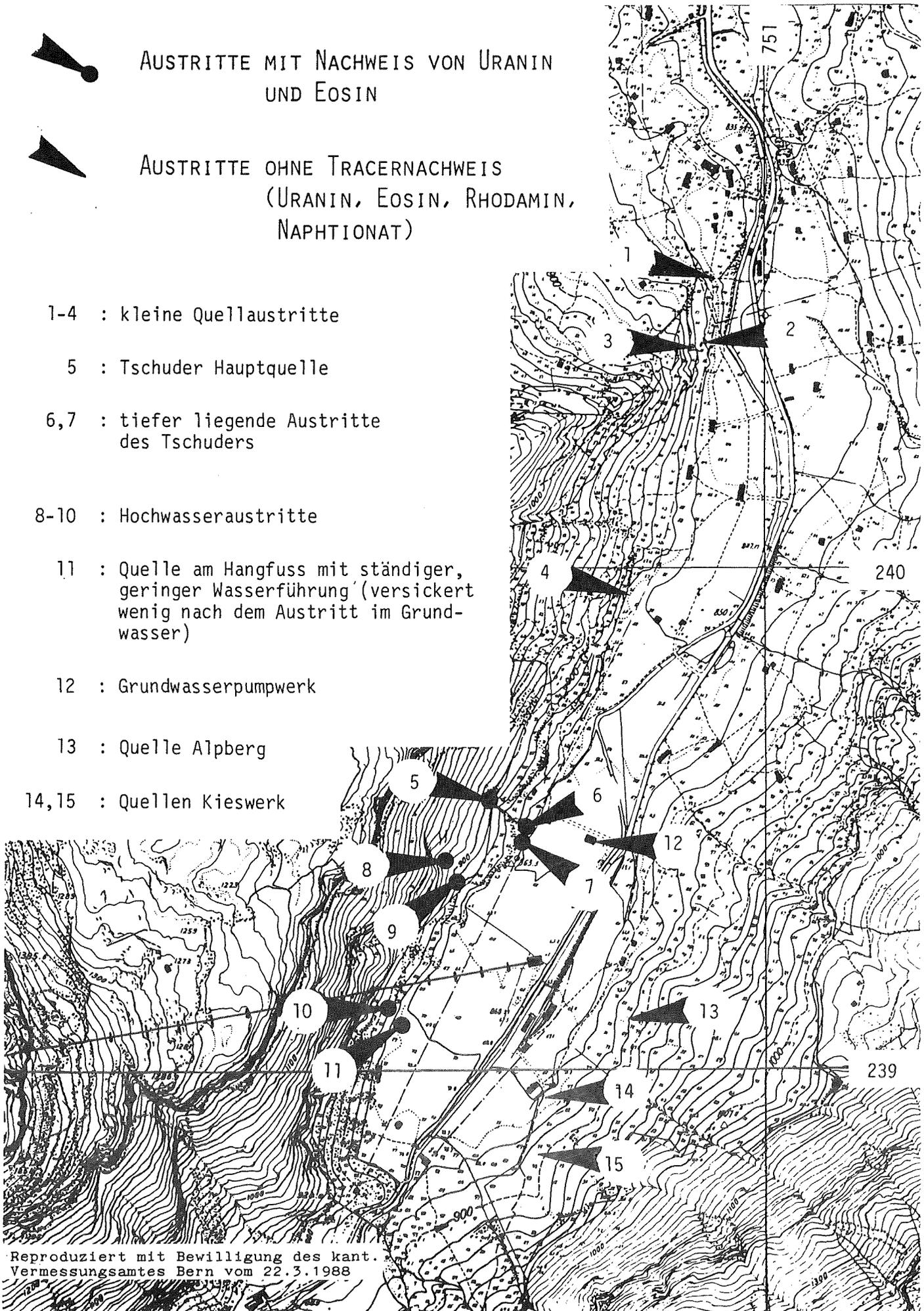
8-10 : Hochwasseraustritte

11 : Quelle am Hangfuss mit ständiger,
geringer Wasserführung (versickert
wenig nach dem Austritt im Grund-
wasser)

12 : Grundwasserpumpwerk

13 : Quelle Alpberg

14,15 : Quellen Kieswerk



Tab. 10.2: Quellgebiet Tschuder: Messwerte der Hochwasserausaustritte am 7.7.1986

Stelle	Nr.(Abb.10.9)	Zeit	Uranin (mg/m ³)	Eosin (mg/m ³)
Tschuder	5	14.30	0.37	6.23
		18.00	0.30	5.96
Bickler, Höhle	8	14.00	0.40	1.28
Bickler, Mitte	9	14.00	0.20	8.40
Fuchsloch	10	17.00	1.60	8.0
Quelle unter Fuchs	11	17.00	1.47	2.0

Der Austritt am Hangfuss (Abb. 10.9, Nr. 11) bildet eine kleine Vernässungszone und versickert dann ins Grundwasser. Er führt immer eine geringe Wassermenge. Die Werte hier zeigen, dass die Eosinkonzentrationen geringer sind als jene des Tschuders, hingegen liegen die Uraninkonzentrationen leicht höher.

10.4.5 Einspeisung Reslen (Abb. 10.10)

Das unterhalb des Seeausflusses in den Schwinden des Seewerkalkes eingespiesene Naphthionat konnte nur in den Gätteriquellen nachgewiesen werden. Automatische Probenehmer waren in der alten Quellfassung und etwas unterhalb beim Limnigraphen im Schwendebach installiert, um auch die ausgebrachte Menge berechnen zu können.

Während des Hauptdurchganges war der Schwendebach oberhalb der Gätteriquellen trocken, eine direkte, oberflächliche Verfrachtung des Tracers kann daher ausgeschlossen werden. Erste Tracerspuren traten nach 6 Stunden 45 Minuten in der Quellfassung auf. Dies ergibt eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 187 m/h. Zweieinhalb Stunden später war bereits das Maximum erreicht. Auch dieser Durchgang war relativ kompakt und wies nur eine Spitze auf. Sämtliche Austritte der Gätteriquellen wiesen bei Stichproben Konzentrationen von Naphthionat in gleicher Grössenordnung auf.

In anderen Quellen konnte Naphthionat nicht nachgewiesen werden, auch nicht im Grundwasserpumpwerk in Wasserauen.

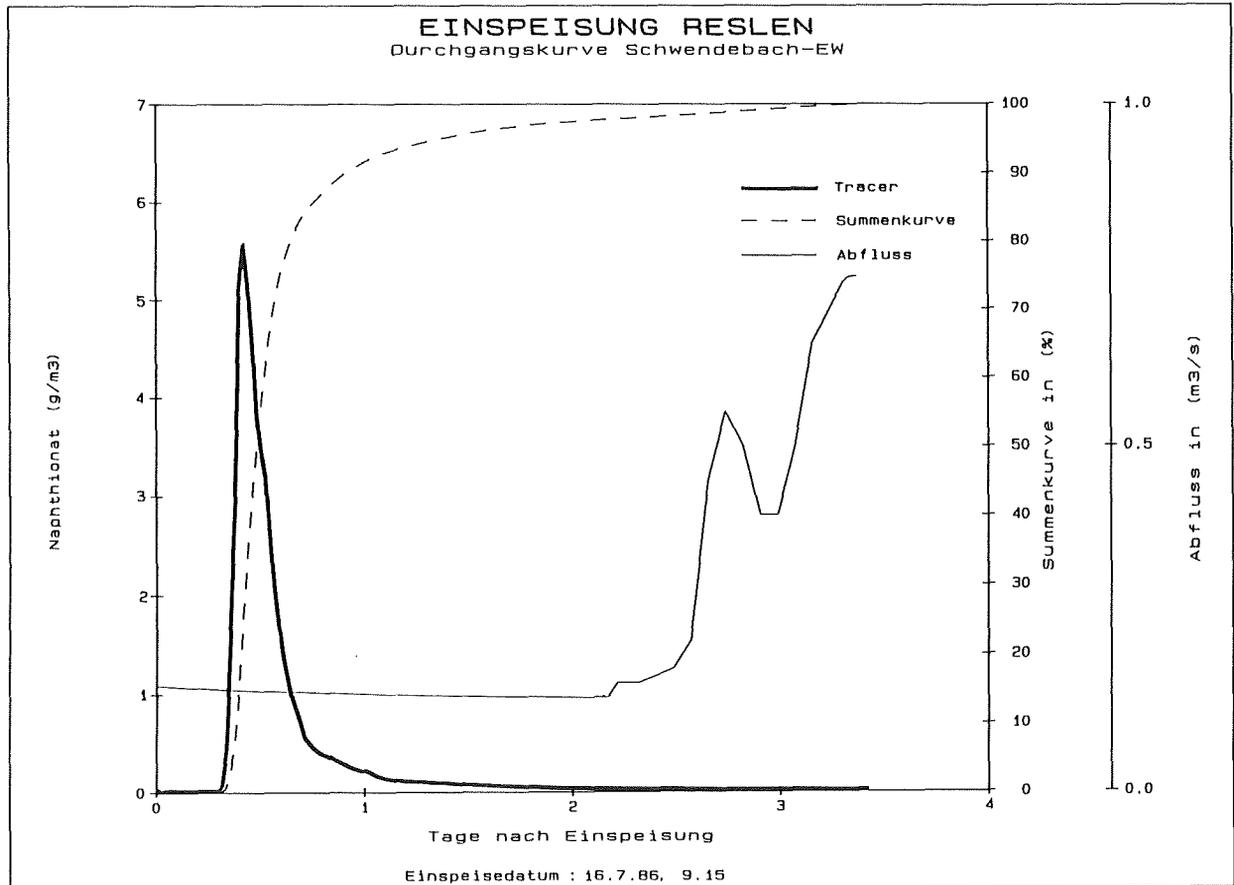


Abb. 10.10: Einspeisung Reslen, Durchgangskurve Schwendebach-EW

10.4.6 Einspeisung Seealpsee (Abb. 10.11)

Auf Grund der nahen Lage zur Einspeisungsstelle bei Reslen in den gleichen Seewerkalken konnte angenommen werden, dass der im Seealpsee eingegebene Tracer auch in den Gäteriquellen wiedergefunden werden könne. Dies war auch tatsächlich der Fall. Es sind nach der Einspeisung auch die Austrittstellen im Bachbett unterhalb des Seealpsees überwacht worden.

Die Fliessgeschwindigkeiten sind geringer als beim Naphthionatversuch. Die geringe Einspeisemenge und das nachfolgende Hochwasser hatten zur Folge, dass nur der erste Teil des Durchganges ausgewertet werden konnten, da die

Konzentrationen bald unter die Nachweisgrenze fielen. Darauf ist auch die berechnete, niedrigere Ausbringrate zu einem guten Teil zurückzuführen. An andern Stellen konnte kein Rhodamin aus dieser Einspeisung nachgewiesen werden.

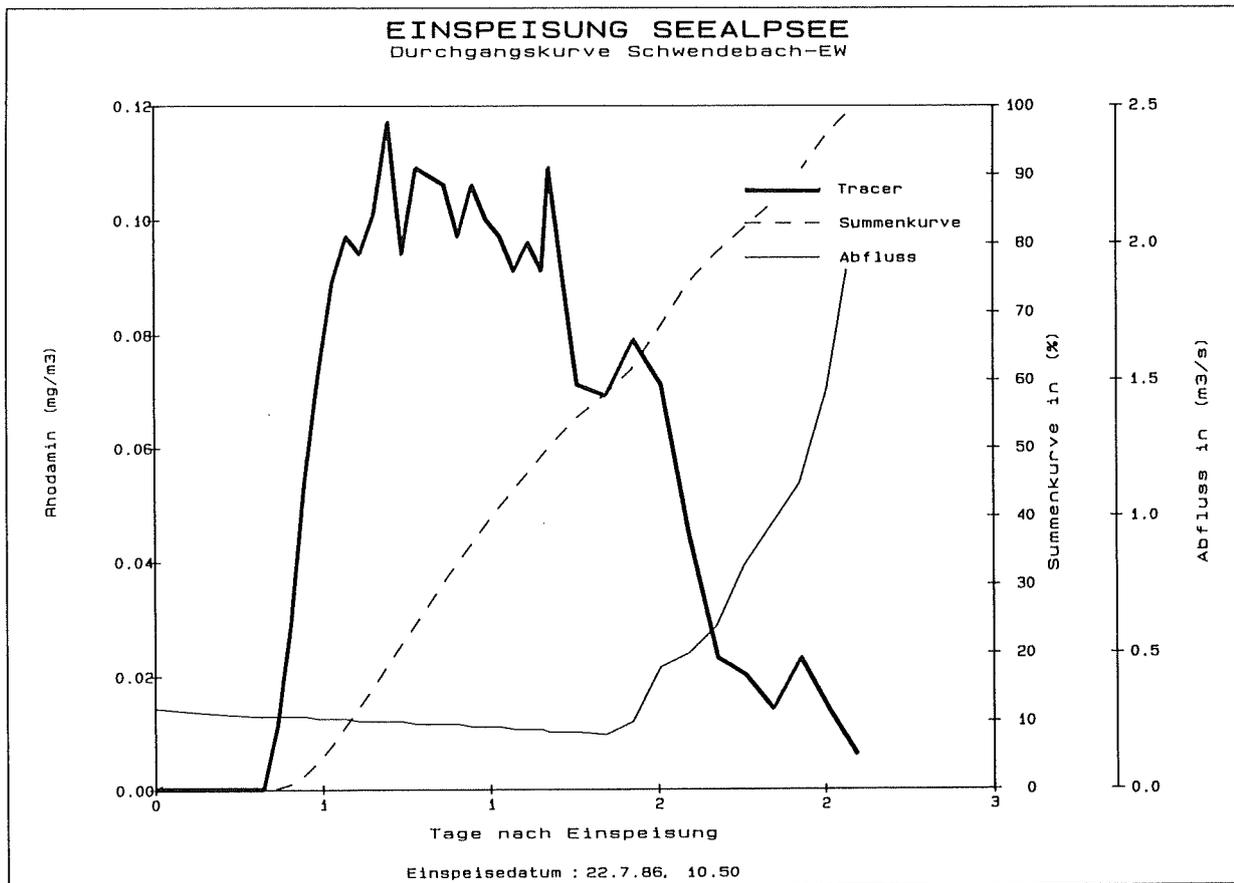


Abb. 10.11: Einspeisung Seealpsee, Durchgangskurve Schwendebach-EW

10.5. Frühere Markierversuche im Gebiet

Im Gebiet der Markierversuche von 1986 sind zwei Untersuchungen mit künstlichen Tracern vorgenommen worden, die gut dokumentiert sind:

- Markierversuche von ARBENZ 1921 im Fälen- und Sämtisersee
- Untersuchungen am Seealpsee 1940

Beide Untersuchungen standen im Zusammenhang mit der Projektierung von Wasserkraftanlagen.

Am 24. Oktober 1921 wurden 3 kg Fluorescein (Uranin) in die Schwinde des Sämtisersees am Südufer eingegeben. Eine Grünfärbung trat nach 24,5 Stunden in der Mühlebachquelle ein. Farbspuren traten auch in der Quellflur bei Läui/Sennwald auf. Vermutete, zweifelhafte Farbspuren an andern Stellen führten zu einem zweiten Versuch.

Am 6. Dezember 1921 sind in der Schwinde des Sämtisersees 200 kg Kochsalz und im Fälensee 5 kg Fluorescein (Uranin) eingegeben worden. Die Salzwelle von der Schwinde des Sämtisersees erreichte diesmal die Mühlebachquelle erst nach 3,5 Tagen, vom Fälensee dauerte es volle 13 Tage bis zum ersten Erscheinen und 15 Tage bis zum Maximum.

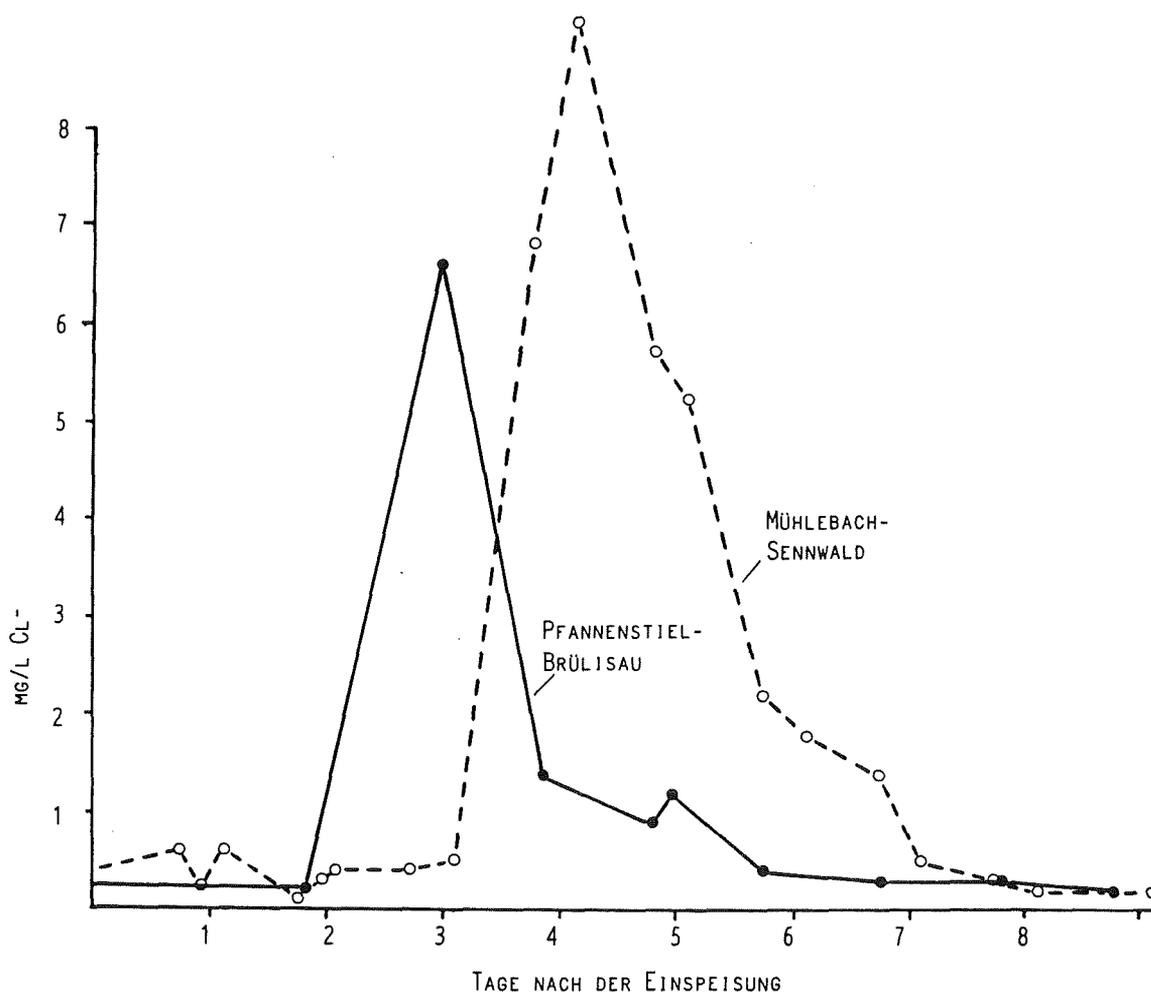


Abb. 10.12: Einspeisung Sämtisersee 6.12.1921 (200kg NaCl) Durchgangskurven Mühlebach-Sennwald und Pfannenstiel-Brülisau (nach ARBENZ 1923)

Neben dieser Hauptverbindung gelang noch der Nachweis der Verbindung vom Sämtisersee zur Quelle Pfannenstiel-Brüli-sau (Maximum 3 Tage nach Einspeisung des Kochsalzes). Andere zweifelhafte Spuren des Markierstoffes ermöglichten keinen sicheren Nachweis. Sie sind denn auch von ARBENZ (1923) als nicht erwiesen betrachtet worden. Trotzdem be ruft sich der Volksmund noch hie und da auf diese vermeintlichen Nachweise. Die Resultate der Einspeisung im Fälensee 1986 mit verbesserten Nachweismöglichkeiten zeigten, dass die Beurteilungen von ARBENZ (1923) richtig waren.

Untersuchungen am Seealpsee ergaben, dass die Wasseraus tritte im Bachbett 100 m unterhalb des Seeauslaufs von Versickerungen im Seezapfen (Bereich des Staudammes) gespiesen werden, und dass Wasser von den Versickerungsstellen bei Reslen wieder in den Gätteriquellen austritt (Unterlagen der Feuerschaugemeinde Appenzell).

11. EINSATZ KUENSTLICHER TRACER 1987

11.1. Hydrometeorologische Bedingungen

Das Frühjahr und der Frühsommer 1987 waren geprägt durch die überaus kühle und nasse Witterung. Dementsprechend war die Schneeschmelze im Verzug. Eine Wetterbesserung trat am 27. Juni ein und brachte einige schöne, trockene Tage vor der Einspeisung am 1. Juli. Trotzdem waren die Abflussmengen bis zu 80% höher als im Vorjahr zur selben Jahreszeit. Der leichte Gewitterregen gegen Abend des 1. Juli, einige Stunden nach den Einspeisungen, führte nur zu einer geringen Abflusserhöhung. Die folgenden Tage waren mehrheitlich durch sommerlich warmes Wetter gekennzeichnet. Abflusswirksame Niederschläge folgten erst wieder in der Nacht zum 8. Juli nach den Hauptdurchgängen der Tracer. Am 18. und 19. Juli traten die höchsten Abflussmengen des Sommers 1987 auf. Sie beeinträchtigten die Markierversuche und ihre Auswertung aber kaum noch. Auf Grund der anderen hydrometeorologischen Bedingungen ist die Vergleichbarkeit der Resultate mit jenen aus dem Vorjahr nur bedingt möglich. Andererseits darf gesagt werden, dass im Hinblick auf den allgemein regnerischen Witterungscharakter des Jahres 1987 die Markierversuche in eine günstige Zeit fielen. Insbesondere blieb das Alpsteingebiet von katastrophalen Gewitterniederschlägen verschont, die zu dieser Zeit weite Teile der Schweiz heimsuchten.

11.2. Einspeisungen

Im Sommer 1987 sind insgesamt vier Einspeisungen fluoreszierender Tracer vorgenommen worden, die insbesondere Aufschluss über die Abflussverhältnisse im südwestlichen Teil des Alpsteins liefern sollten. Der Zeitpunkt der Einspeisung wurde wie im Vorjahr auf den 1. Juli festgesetzt. Tabelle 11.1 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Einspeisedaten.

Tab. 11.1: Einspeisungen 1987 im Alpsteingebiet

Ort	Datum Zeit	Tracer Menge	Art der Einspeisestelle
Säntis 744075/234875	1.7.87 9.50-10.20	10 kg Rhodamin in 30l Aethylen- glycol+500l Wasser	Abwasserversicke- rung im Seewer-u. Schrattenkalk
Risi 739350/230160	1.7.87 9.03-15	1 kg Eosin in 10 l Wasser	Schwinde 10 l/s
Zwinglipass 746250/233200	1.7.87 12.30	5 kg Uranin in in 40 l Wasser	Höhle (Abb. 11.1)
Stein 743950/231150	1.7.87 10.00-15	30 kg Naphthionat in 260 l Wasser	Schwinde im Seewerkalk 0.1 l/s

Die Einspeisemengen sind gegenüber dem Vorjahr auf Grund der gemachten Erfahrungen tiefer angesetzt worden. Trotz der deutlich höheren Abflussmengen 1987 waren sie für einen zuverlässigen Nachweis noch ausreichend.

Etwas problematisch war die Einspeisung in der Kläranlage auf dem Säntis. Die Einspeisung des Tracers erfolgte in den Ueberlauf der Kläranlage, wo schwallweise rund 200 l geklärtes Abwasser ausfliessen. Dieses Wasser fliesst über die Südwand des Säntisgipfels ab und versickert anschliessend in einem Geröllfeld auf Schrattenkalk. Aus Rücksicht auf die Lichtempfindlichkeit der meisten Tracer wurde hier das Rhodamin eingespeist, das einen relativ geringen photolytischen Zerfall der Fluoreszenz aufweist (BEHRENS 1982:69ff). Andererseits weist das Rhodamin ein ungünstiges Adsorptionsverhalten auf (DERVEY 1985). Bei einer Einspeisung in die ungesättigte Zone auf einem Berggipfel musste so zum vornherein mit einer relativ kleinen Ausbringrate gerechnet werden. Diese Randbedingungen erforderten eine gute Vorlösung des Tracers, der in Wasser nur eine Löslichkeit von rund 20 g/l aufweist. Als Lösungsmittel sind 30 l Aethylenglycol verwendet worden. Ein Tag nach der Einspeisung war die Felswand unter dem Ablaufrohr weithin als roter Fleck erkennbar. Zehn Tage später war durch die Auswaschung und Ausbleichung auch auf dem Säntisgipfel kaum mehr etwas von der Einspeisung zu erkennen.

Problemlos waren die Einspeisungen in die Schwinden Risi (Gräppelenriet) und Stein (bei Dreihütten). Der vorgelöste Tracer konnte hier in eine Schwinde mit konstantem Abfluss eingegeben werden. Auf dem Zwinglipass erfolgte die Einspeisung durch die Höhlenforscher der Ostschweizerischen Gesellschaft für Höhlenforschung (OGH) in einem Schacht in einen Höhlenbach. Der Höhlenplan (Abb. 11.1) zeigt einen Aufriss des Oberschärenschachts und die Lage der Einspeisungsstelle in rund 135 m Tiefe.

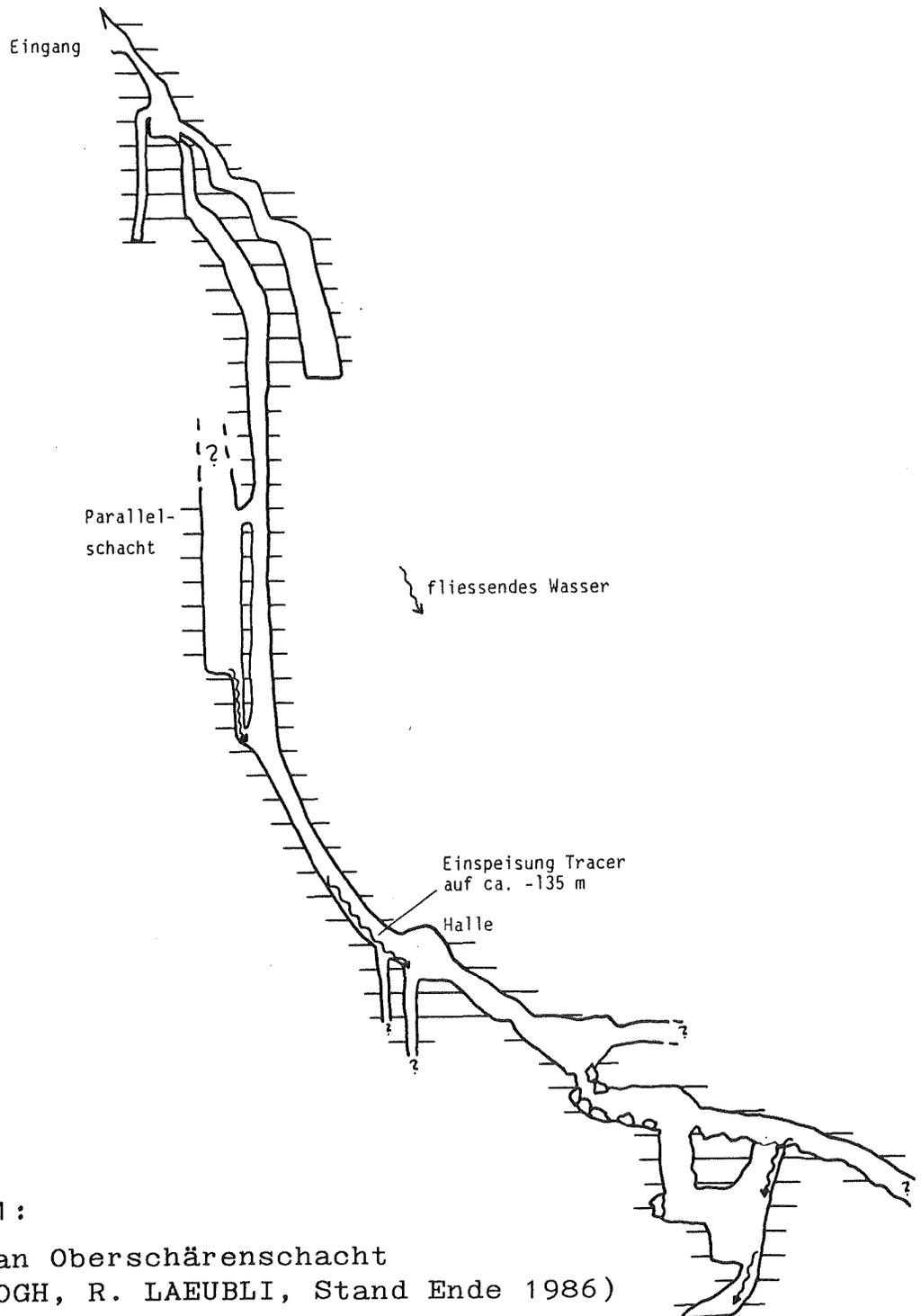


Abb. 11.1:
Höhlenplan Oberschärenschacht
(Skizze OGH, R. LAEUBLI, Stand Ende 1986)

11.3 Probenahme

11.3.1 Automatische Probenahmegeräte

Für die Markierversuche 1987 sind 7 automatische Probenahmegeräte eingesetzt worden. Abbildung 11.2 zeigt die Intervalle und Einsatzdauer der Geräte. Die raschen Durchgänge führten zu einem relativ frühen Abbruch der Probenahme. Einzig im Porengrundwasser des Obertoggenburgs wurden etwas länger Proben entnommen, da hier mit geringeren Fließgeschwindigkeiten gerechnet werden musste. Die Geräte waren ohne Ausfall in Betrieb. Es sind rund 1100 Proben entnommen und analysiert worden.

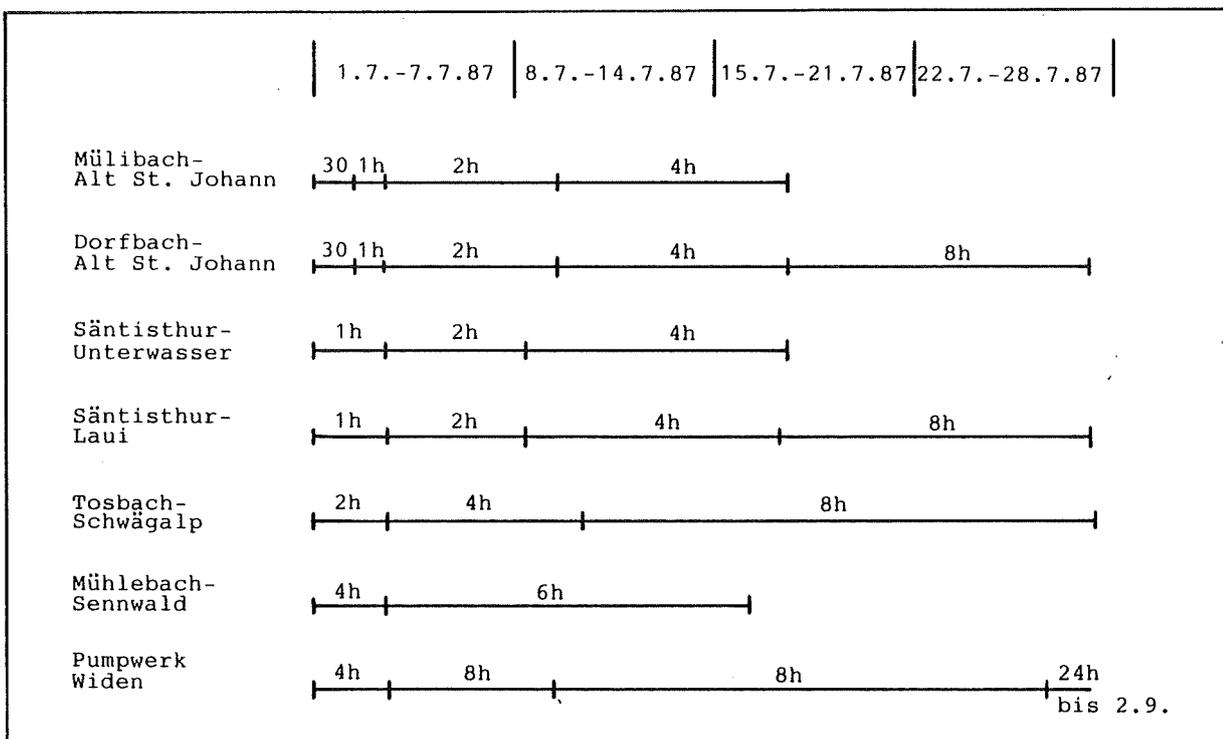


Abb. 11.2: Probenahmeintervalle der automatischen Probenahmegeräte 1987

11.3.2 Aktivkohleproben

An 27 Stellen sind Aktivkohlesäckchen exponiert worden (siehe Hydrogeographische Karte, Beilage). In der Regel betrug die Einhängzeit bis Ende Juli eine Woche. Für die Blindproben wurde bereits vor der Einspeisung eine Serie eingehängt und wieder entfernt.

11.3.3 Handproben

Zahlreiche weitere Stellen sind von Hand beprobt worden. Dies betraf insbesondere die zahlreichen Quellen in Alt St. Johann und im Gebiet Thurwies-Lauiboden. Insgesamt sind rund 600 Proben von Hand entnommen worden. Die Stellen sind ebenfalls auf der Hydrogeographischen Karte (Beilage) verzeichnet.

Auf Grund der geologischen Strukturen und früherer Markierversuche musste auch mit einem Abfluss der Markierstoffe in der Rinquelle (bei Betlis am Walensee) gerechnet werden. Hier konnte eine Anwohnerin für die Probenahme gewonnen werden.

11.4. Resultate

11.4.1 Einspeisung Säntisgipfel (Abb. 11.3,4)

Der erste Nachweis des Rhodamins in der Säntisthur-Lau erfolgte wider Erwarten rasch, bereits zehn Stunden nach der Einspeisung. Dies ergibt die sehr hohe maximale Abstandsgeschwindigkeit von 408 m/h. Der Markierstoff gelangte offensichtlich rasch in ein gut entwickeltes, aktives Gerinne des Karstwassersystems. Abbildung 11.3 zeigt den Tracerdurchgang mit seinem deutlichen Tagesgang. Eine detaillierte Betrachtung zeigt, dass die Maxima der Tracerkonzentration mit den Minima des Abflusses zusammenfallen. Die Schwankungen der Tracerkonzentration sind aber grösser als jene des Abflusses. Der Tagesgang der Tracerkonzentration kann daher nicht durch eine Verdünnung erklärt werden. Die Verschiebung der Tracerganglinie gegenüber der Abflussganglinie entspricht der zeitlichen Verzögerung durch die Fliesszeit des Tracers, der bei erhöhter Schneeschmelze während des Tages ins Karstwassersystem gelangt. Der Anstieg des Abflusses erfolgt auf Grund der hydraulischen Fortpflanzung rascher. Bis 28 Tage nach Einspeisung konnten in der Säntisthur-Lau 33% des Markierstoffes wieder ausgebracht werden. In Anbetracht der Sorptionseigenschaften des Rhodamins und der Einspeisebedingungen ein recht bedeutender Anteil.

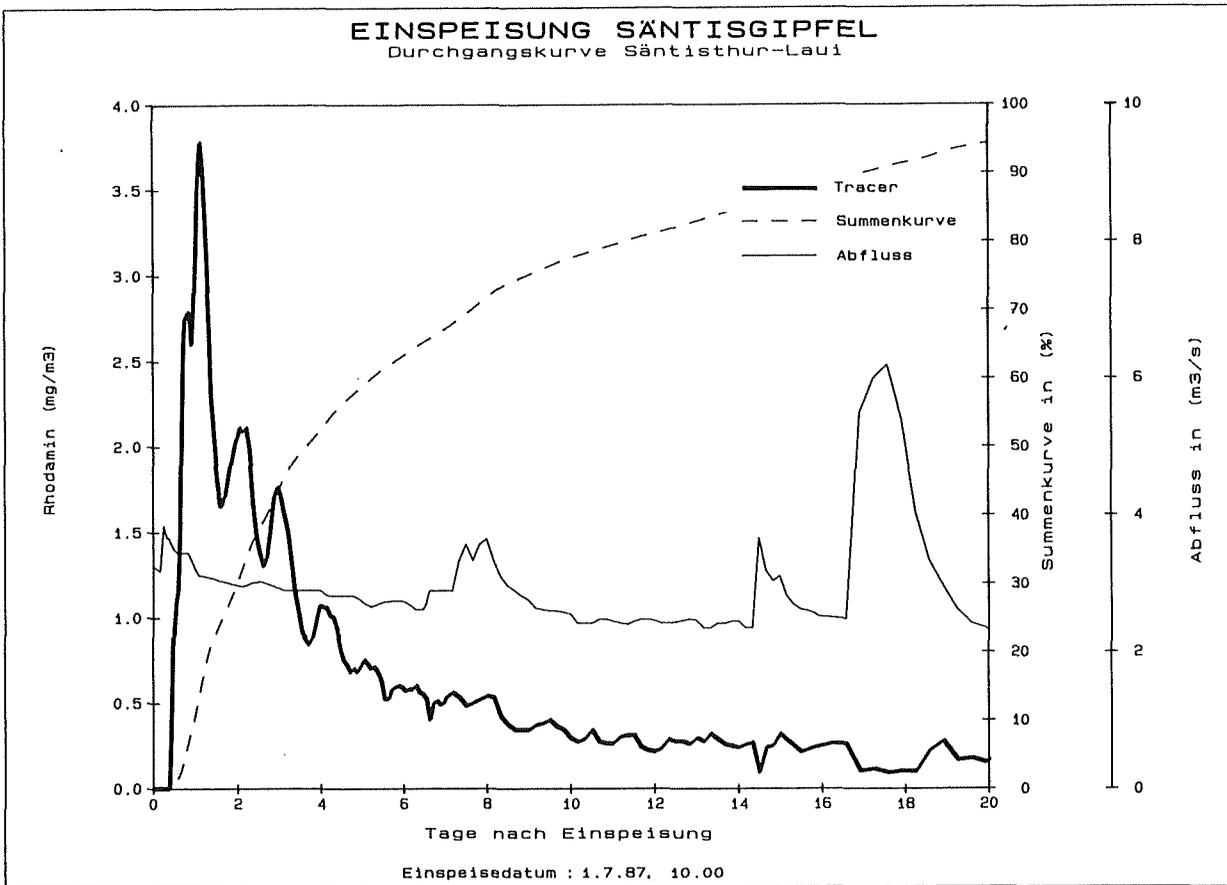


Abb. 11.3: Einspeisung Sämtisgipfel, Durchgangskurve Sämtisthur-Lau1

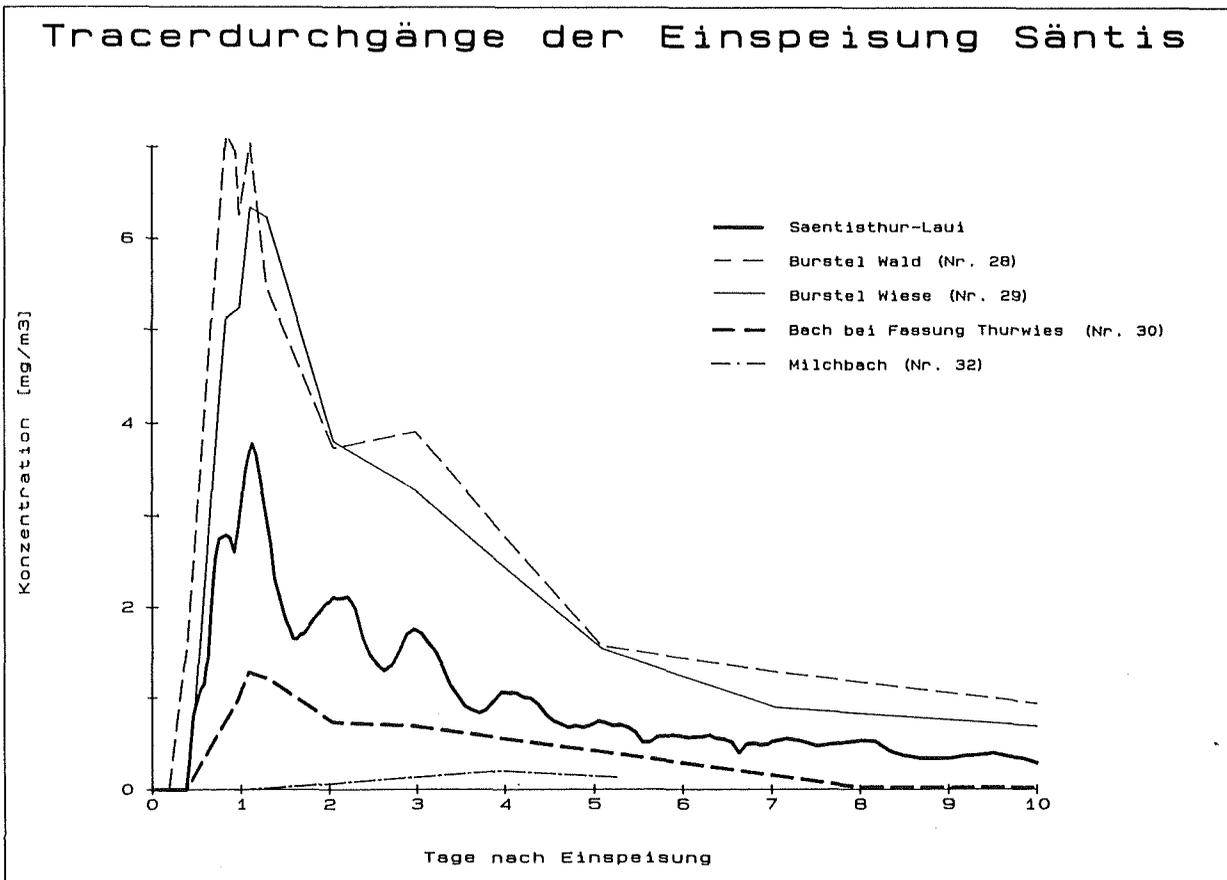


Abb. 11.4: Tracerdurchgänge der Einspeisung Sämtis (Nr. vgl. Hydrogeographische Karte, Beilage)

Der Markierstoff floss der Sämtisthur-Lauí aus verschiedenen Quellen im Gebiet Lauiboden-Thurwies zu. Abbildung 11.4 zeigt eine Zusammenstellung der gemessenen Durchgänge. Den grössten Anteil an der gesamten Fracht lieferten die beiden Quellen am Burstel, wobei die am Waldhügel liegende Quelle etwas früher ansprach als die Quellaustritte in der Wiese. Zur Zeit des Tracerhauptdurchganges schütteten die Quellen am Burstel 39% der Abflussmenge an der Station Sämtisthur-Lauí. Deutliche Tracernachweise waren in allen Quellen auf der rechten Talseite im Lauiboden möglich. Die südlichsten Austritte fliessen oberhalb der Gräpelenstrasse in den Seebach.

In der Thurwies wurde Rhodamin nur im Quellaustritt oberhalb der Fassung der Korporation Chüeboden am Burstel nachgewiesen. Die Direktproben in der Fassung zeigten nur negative Resultate. Die eingehängte Aktivkohle zeigte aber eindeutige Spuren von Rhodamin. In den anderen Quellen in der Thurwies konnte nie Markierstoff nachgewiesen werden.

Rund 29 Stunden nach Einspeisung trat Rhodamin auch im Milchbach unterhalb Starckenbach auf. Dies ergibt ebenfalls eine hohe maximale Abstandsgeschwindigkeit von 345 m/h.

Ein Spurennachweis von Rhodamin war auch in der Rinquelle bei Betlis ab dem Abend des 6. Juli möglich. Die Konzentrationen lagen bei 0.007 mg/m^3 , ein Probe am 10. Juli wies 0.1 mg/m^3 auf. Der Nachweis konnte durch die Aktivkohle nicht bestätigt werden. Dieser Teil des Markierstoffes muss direkt unterirdisch unter dem Thurtal durch ins Churfürstenmassiv geflossen sein. Wäre er durch die Versickerung der Thur in das Karstwassersystem der Rinquelle gelangt, hätte auch der Tracer Uranin nachweisbar sein müssen, der in viel höherer Konzentration in der Thur auftrat.

Ab dem 3. Juli konnten Spuren von Rhodamin auch in den Quellen von Alt St. Johann nachgewiesen werden. Es handelte sich nicht um einen schön ausgebildeten Tracerdurchgang, wie er sonst überall angetroffen wurde. Die Konzentrationen lagen immer sehr tief bei 0.01 bis 0.05 mg/m^3 . Auf Grund dieser Charakteristik können diese Tracerspuren auf eine Versickerung von markiertem Wasser der Sämtisthur im Chämmerlitobel zurückgeführt werden. Diese Versickerungsstelle ist im Herbst deutlich erkennbar. Bei einer geschätzten Versickerungsleistung von rund 200 l/s sind die gemessenen Konzentrationen in den Quellen von Alt St. Johann plausibel.

Auf der Appenzeller Seite und auf der Schwägälp war nie Rhodamin nachweisbar.

11.4.2 Einspeisung Schwinde Stein (Abb. 11.5-8)

Die Einspeisung in der Schwinde am Stein bestätigte, die auf Grund der Aufnahme von Quellen und Gewässernetz aufgestellte Hypothese, dass die Entwässerung in Richtung der Faltenachsen erfolgt. Das Naphthionat konnte einerseits in der Sämtisthur-Unterwasser und andererseits in den Quellen in Alt St. Johann nachgewiesen werden. Das Naphthionat fließt der Thur im Chämmerlitobel zu. Die Zutrittstellen (wahrscheinlich handelt es sich um mehrere) konnten bei der Hochwassersituation nicht genau lokalisiert werden. Proben oberhalb des Wasserfalles waren aber negativ. Die Austrittstellen liegen somit im Kern des hier von der Thur durchschnittenen Gulmengewölbes, der südlichsten Antiklinale des Alpsteins. Es ergab sich für diesen Durchgang die relativ geringe mittlere Abstandsgeschwindigkeit von rund 50 m/h und eine Ausbringrate von 11.5 %.

Höhere Fliessgeschwindigkeiten konnten für die hydrologische Verbindung zu den Quellen in Alt St. Johann ermittelt werden. Die mittleren Abstandsgeschwindigkeiten liegen hier bei 90 m/h. Der erste Nachweis ist in Alt St. Johann etwa zeitgleich mit dem Auftreten in der Sämtisthur-Unterwasser. Der Fliessweg nach Alt St. Johann bildet nicht einfach die Fortsetzung des Fliessweges zum Chämmerlitobel. Die Auftrennung muss früher erfolgen.

Die Durchgänge in Alt St. Johann erfolgen alle gleichzeitig, mit Ausnahme des Durchganges bei der Quelle Bürgerheim, der etwas später folgt (vgl. Abb. 11.8). Ungeklärt ist das Phänomen der Schwankungen beim Naphthionat im Dorfbach. Denkbar sind Abbauprozesse auf Grund periodisch auftretender Wasserinhaltsstoffe (Abwasser ?), da die Minima immer am Abend (20-22 Uhr) und am Morgen (6-8 Uhr) auftreten. Die relativ geringe totale Ausbringrate von 53% könnte auch damit im Zusammenhang stehen.

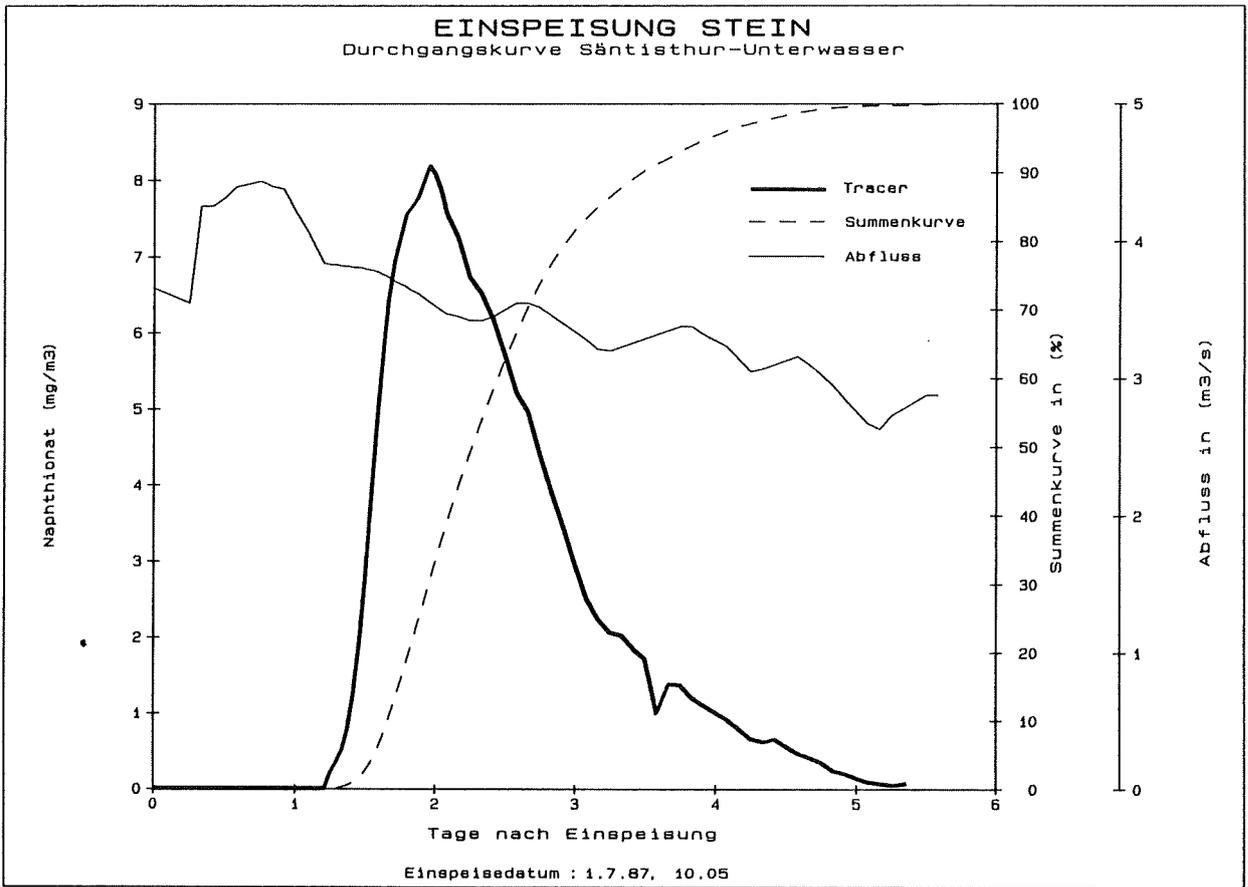


Abb. 11.5: Einspeisung Stein, Durchgangskurve Sämtisthur-Unterwasser

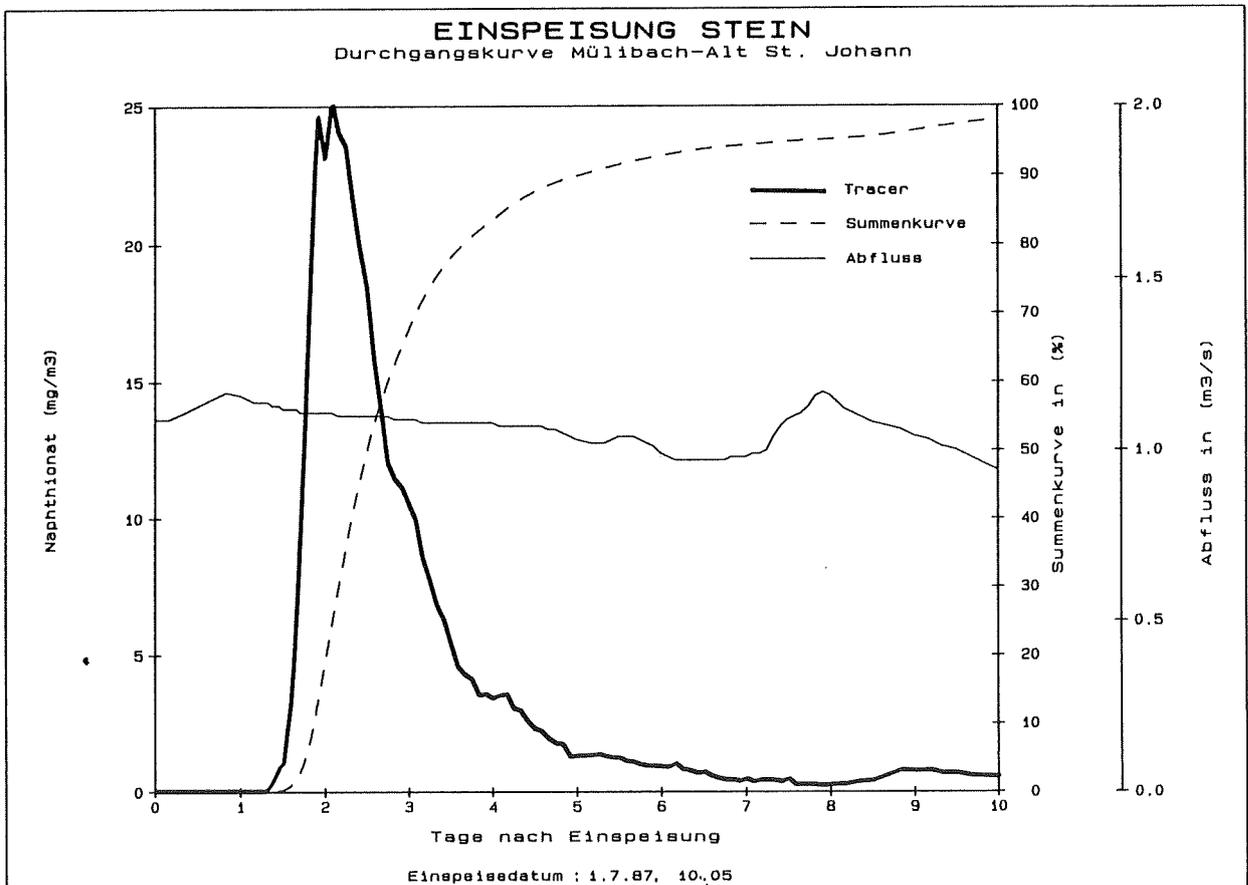


Abb. 11.6: Einspeisung Stein, Durchgangskurve Mülibach-Alt St. Johann

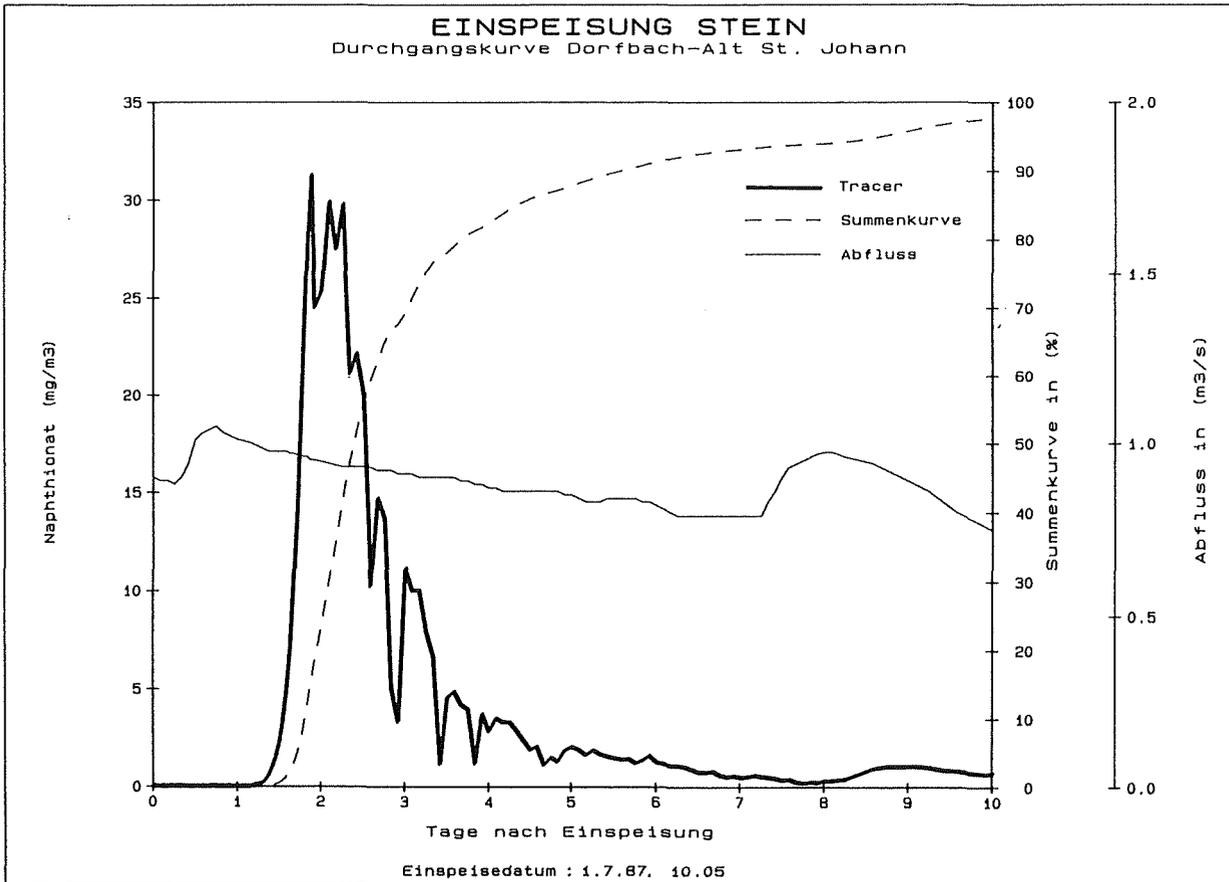


Abb. 11.7: Einspeisung Stein, Durchgangskurve Dorfbach-Alt St. Johann

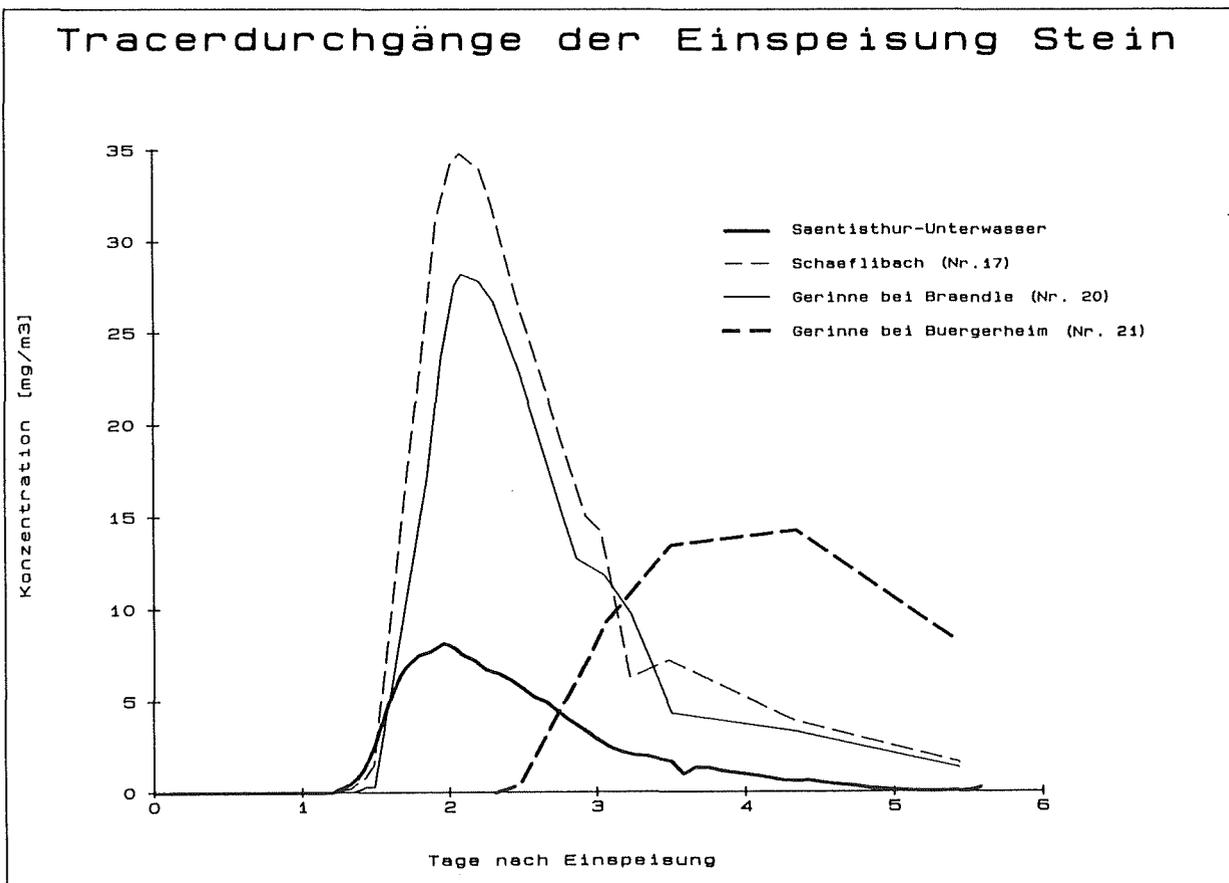


Abb. 11.8: Tracerdurchgänge der Einspeisung Stein (Nr. vgl. Hydrogeographische Karte, Beilage)

11.4.3 Einspeisung Zwinglipass (Abb. 11.9-11)

Die Einspeisung im Höhlenbach auf dem Zwinglipass erfolgte in einen sehr gut ausgebildeten Fliessweg. Die mittleren Abstandsgeschwindigkeiten der Hauptdurchgänge lagen bei 200 m/h und mehr. Wie bei der Einspeisung in der Schwinde Stein trat ein Teil des Markierstoffes im Chämmerlitobel im Schrattenkalk des Gulmengewölbes aus (Abb. 11.9). Die ausgebrachte Tracermenge betrug hier 24%.

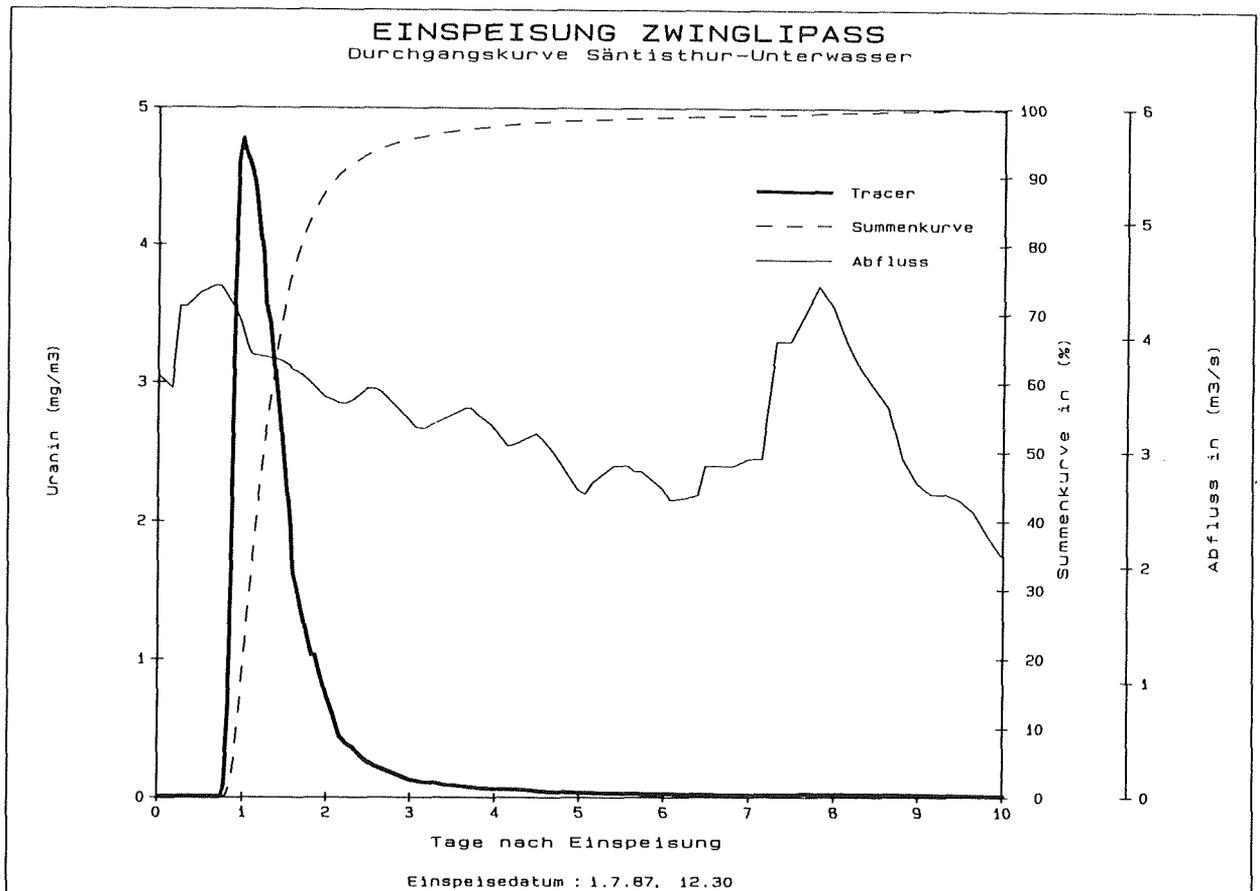


Abb. 11.9: Einspeisung Zwinglipass, Durchgangskurve Sämtisthur-Unterwasser

Etwas grössere, mittlere Abstandsgeschwindigkeiten erreichten wie beim Naphthionat (Einspeisung Stein) die Durchgänge in Alt St. Johann (Abb. 11.10), dies trotz dem kleineren, mittleren Gefälle. Eine Auswahl der Durchgänge (Abb. 11.11) zeigt die zeitliche Abfolge dieser Durchgänge entsprechend den Distanzen. Spuren von Uranin konnten auch

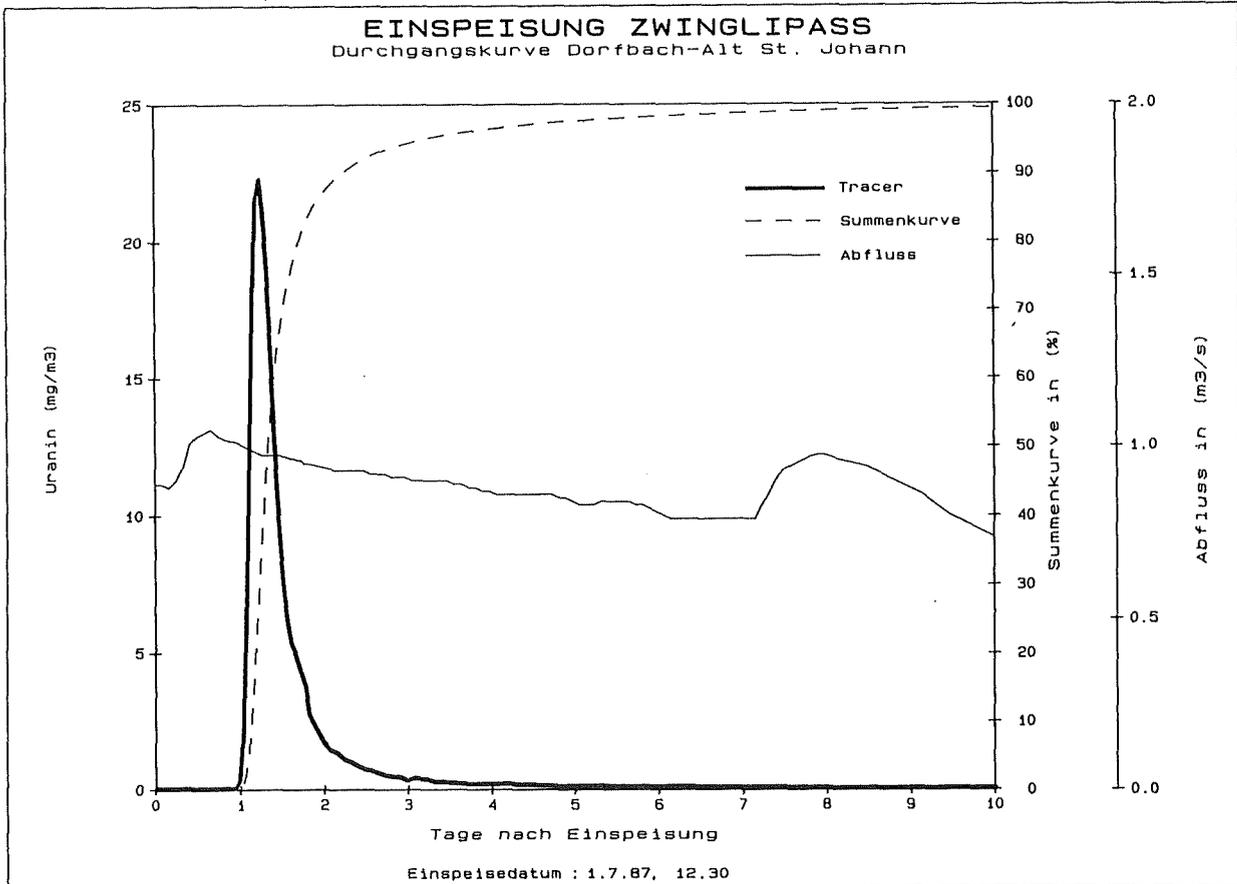


Abb. 11.10: Einspeisung Zwinglipass, Durchgangskurve Dorfbach-Alt St. Johann

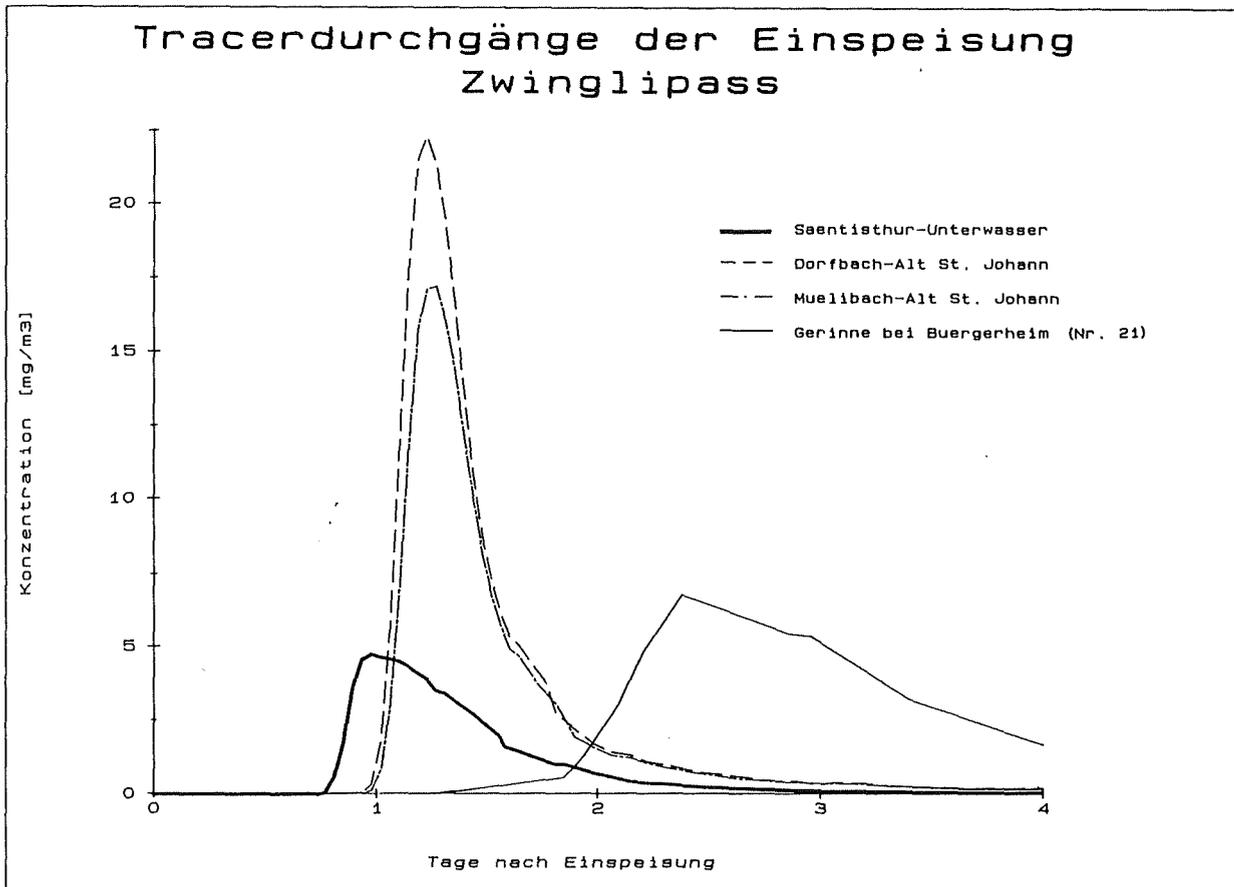


Abb. 11.1: Tracerdurchgänge der Einspeisung Zwinglipass (Nr. vgl. Hydrogeographische Karte, Beilage)

im Schiessbach (zwischen Alt St. Johann und Unterwasser) gefunden werden. Der Markierstoff folgte somit dem durch das Gulmengewölbe vorgezeichneten Fliessweg. Allerdings gelangte der Tracer rascher in das Hauptfliesssystem als jener von der Schwinde Stein. Dies kann auch die höhere Ausbringrate erklären. Unter Berücksichtigung der nicht erfassten Quellaustritte in Alt St. Johann liegt sie bei 85-90% (erfasste Austritte 79%).

An anderen Stellen, weder im Rheintal noch bei Wildhaus, konnte nie Uranin nachgewiesen werden.

11.4.4 Einspeisung Schwinde Risi (Abb. 11.12)

Wie erwartet konnte das Eosin in den Quellen von Alt St. Johann wieder gefunden werden. An anderen Stellen erfolgte kein Eosinnachweis. Erstaunlich waren die geringen

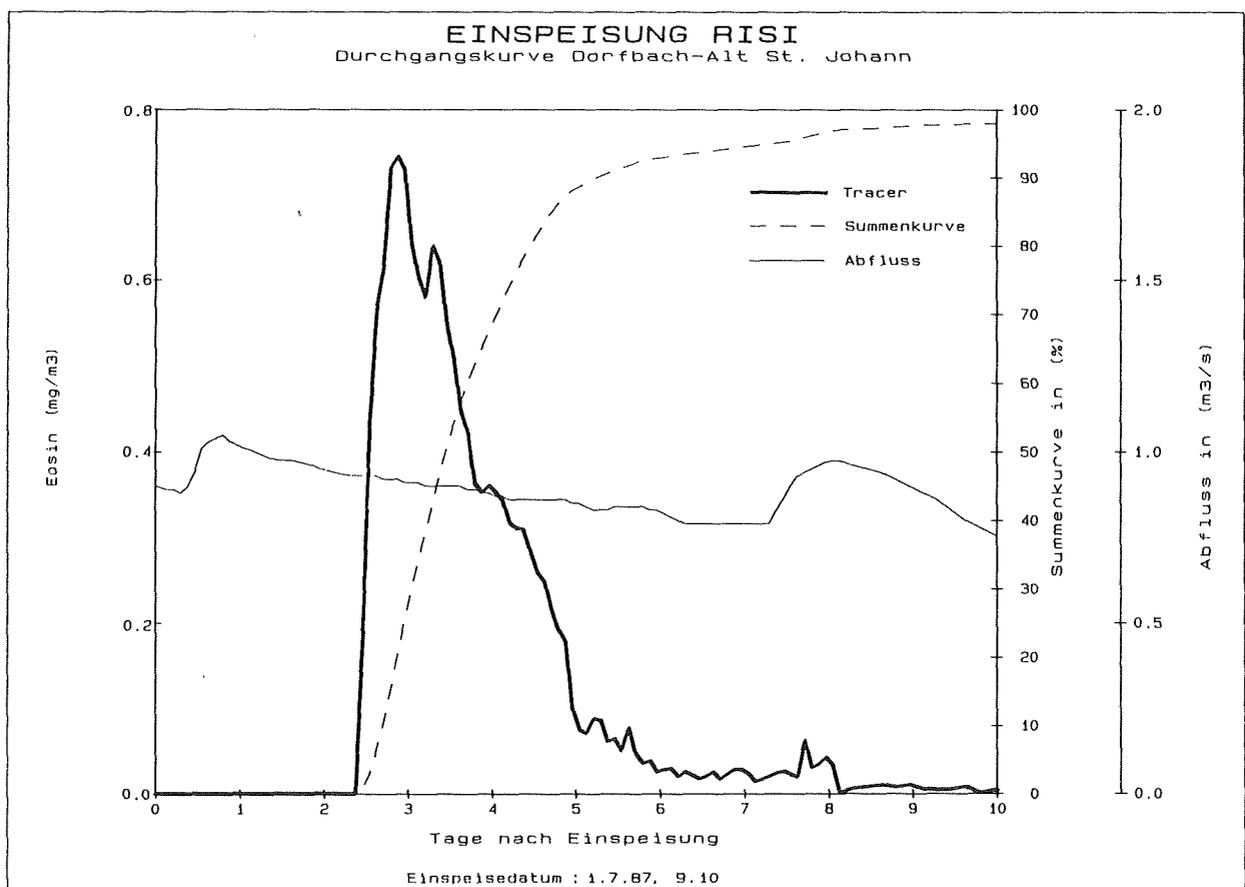


Abb. 11.12: Einspeisung Risi, Durchgangskurve Dorfbach-Alt St. Johann

Fließgeschwindigkeiten. Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit betrug nur rund 18 m/h. Der Markierstoff trat in allen Quellen von Alt St. Johann auf, wobei die gemessenen Konzentrationen bei den westlichen Quellen (ab Dorfbach) höher liegen, sie reagierten ebenfalls etwas früher. Der Durchgang bei der Quelle Bürgerheim folgte mit einer zeitlichen Verzögerung.

Tab. 11.2: Zusammenstellung der Ausbringraten der Tracerdurchgänge im oberen Toggenburg
(Nr. siehe Hydrogeographische Karte, Beilage)

	Einspeisung Zwinglipass			Einspeisung Risi			Einspeisung Stein		
	Ausbringrate in %	mittl. Schüttung in m ³ /s	relative Ausbringrate (g/m ³ /s)	Ausbringrate in %	mittl. Schüttung in m ³ /s	relative Ausbringrate (g/m ³ /s)	Ausbringrate in %	mittl. Schüttung in m ³ /s	relative Ausbringrate (g/m ³ /s)
Schäflibach (Nr. 17)	1.65	0.082	1.00	0.95	0.081	0.12	1.12	0.082	4.11
Vorder Bach (Nr. 18)	3.00	0.16	0.94	2.04	0.16	0.13	2.11	0.16	3.96
Dorfbach (Nr. 14)	17.63	0.95	0.93	9.62	0.89	0.14	10.44	0.95	3.3
Pumpwerk (Nr. 16)	1.54	0.10	0.76	2.30	0.10	0.23	1.12	0.10	3.36
Mülibach (Nr. 15)	16.89	1.13	0.75	27.0	1.08	0.25	11.53	1.10	3.15
Ger.b.Looser (Nr. 19)	3.70	0.24	0.77	6.15	0.24	0.25	2.66	0.24	3.37
Ger.b.Brändle (Nr. 20)	9.85	0.62	0.80	15.56	0.59	0.26	6.64	0.61	3.27
Bürgerheim (Nr. 21)	0.95	0.055	0.87	0.83	0.055	0.15	0.50	0.055	2.73
Säntisthur- Unterwasser (Nr. 9)	23.8	4.00		0			11.5	3.50	
Summe	79			64.5			47.6		
inkl. ungemessene Aus- tritte in Alt St. Johann	85			75			53		

Die höheren Konzentrationen in den westlichen Quellen können durch den Verdrängungseffekt des aus Nordosten zufließenden Wassers erklärt werden. Bei den mit Probenehmern erfassten Durchgängen ist eine eindeutige Zweigipfligkeit der Konzentrationskurve erkennbar, die auf zwei verschiedene Fließwege hindeutet. Die weiteren Unregelmäßigkeiten der Kurve sind z.T. auf die verminderte Analysegenauigkeit wegen dem Auftrennverfahren der Eosin-Uranin-Gemische zurückzuführen.

Es musste festgestellt werden, dass bei den in Alt St. Johann verwendeten Probenahmegeräten (weisses, durchsichtiges Kunststoffgehäuse) trotz Braunglasflaschen die photolytische Zersetzung des Eosins während 2-3 Tagen, die die Proben im Gerät standen, nicht vernachlässigt werden kann. Unter Berücksichtigung dieses Effektes beträgt die Ausbringrate aller Quellen in Alt St. Johann 65%. Berücksichtigen wir auch die nicht mit Lattenpegeln erfassten Quellen von Alt St. Johann liegt sie bei 75%. Diese Ausbringrate kann bei den offenbar wenig ausgebildeten Fließwegen und den damit geringen Fließgeschwindigkeiten als hoch bezeichnet werden.

11.5. Frühere Markierversuche im Gebiet

Im Zusammenhang mit Abklärungen für eine mögliche Wasserkraftnutzung wurde bereits vor Jahrzehnten eine Einspeisung bei der Schwinde Risi durchgeführt. Davon sind aber keine positiven Resultate bekannt. Ebensowenig von der Anfang 60er Jahre durchgeführten Einspeisung auf dem Säntisgipfel.

Gesicherte Resultate liegen von den Markierversuchen vor, die KEMPF (1968) durchgeführt hat. Mit der Einspeisung am 5.9.1966 beim Gruebenseeli wies er hydrologische Verbindungen zu den Quellen in der Thurwies und am Burstel nach. Der Markierstoff erschien bereits nach einem Tag in der Wandquelle in der Thurwies, in anderen, benachbarten Quellen etwas später. Mit zwei weiteren Einspeisungen 1968 wies KEMPF(1968) noch weitere lokale unterirdische Verbindungen nach.

12. GRUNDZUEGE DER HYDROLOGIE DES ALP- STEINS UND BEURTEILUNG

(SYNOPTISCHE AUSWERTUNG DER RESULTATE)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aller Datenauswertungen zusammengefasst. Ihre Ueberlagerung erlaubt umfassendere Interpretationen und eine gegenseitige Ueberprüfung. Die Resultate werden damit in übersichtlicher Form direkt für praktische Anwendungen greifbar. Dieser Schritt entspricht im Ablauf des Untersuchungsprogramms (Abb. 4.4) dem Syntheseschritt. Aus den Daten werden Ergebnisse bezüglich Einzugsgebietsfläche, Einzugsgebietslage und Speicher gewonnen (vgl. Tab. 4.3). Aus Einzugsgebietsfläche und -lage ergibt sich die Abgrenzung der Einzugsgebiete. Dazu werden Ergebnisse aus Abflussmessungen und Markierversuchen ausgewertet. Die Markierversuche liefern einerseits Informationen über hydrologische Verbindungen, die nachgewiesen werden konnten, andererseits lassen sich aus der Gesamtheit der Markierversuche Schlüsse bezüglich der allgemeinen Fliessverhältnisse ziehen. Diese können zur Abschätzung der Einzugsgebiete ebenfalls beigezogen werden. Daraus lässt sich ein allgemeiner Ueberblick der Entwässerung des Alpsteins gewinnen.

Abschliessend werden die Kenntnisse der detaillierter betrachteten Quellen dargestellt, darauf aufbauend ist auch eine Beurteilung möglich. Damit werden direkt die gestellten Fragen aus praktischer Sicht beantwortet. In der Hydrogeographischen Karte (Beilage) sind die Ergebnisse kartographisch dargestellt.

12.1. Allgemeine Fliessverhältnisse

12.1.1 Fliessrichtung

Allgemein wird in einem gut entwickelten Karstwassersystem eine Entwässerung zum tiefsten Vorflutniveau angenommen (vgl. Kap. 4.2.3). Betrachten wir den Alpstein als Ganzes liegt das Vorflutniveau im Rheintal. Ein Blick auf die kartographische Darstellung der nachgewiesenen hydrologischen Verbindungen und die Einzugsgebiete zeigt, dass dies im Alpstein nicht der Fall ist. Vielmehr folgt die

Fliessrichtung sehr stark den geologischen Faltenachsen, die hie und da, mutmasslich entlang von Querbrüchen, durchbrochen werden. Die geologischen Strukturen führen zur Ausrichtung der Entwässerung auf ein lokales Vorflutniveau in Richtung der Faltenachsen (Obertoggenburg, Wasserauen, Brülisau). Die zwischengeschalteten, wenig verkarstungsfähigen Gesteinsserien unterbinden das Fliessen quer zu den Faltenachsen. Diese Schichten fallen entsprechend der tektonischen Lage oft sehr steil oder gar senkrecht ein und führen so zu einer Gliederung parallel den Falten.

Diese Kenntnisse können zur Hypothesenbildung für allfällige Markierversuche und sonstige Abklärungen nützlich sein, es lassen sich daraus aber keine gefestigten Schlüsse ziehen, da lokal durch Klüfte und Bruchstrukturen immer vom allgemeinen Bild abweichende Verhältnisse auftreten können.

12.1.2 Abstandsgeschwindigkeit

Die wichtigsten Kennzahlen der Tracerdurchgänge sind in der Tabelle 12.1 zusammengestellt. Da die wirklichen Fliesswege nicht bekannt sind, wird immer die Abstandsgeschwindigkeit verwendet. Für die Einspeisungen Ebenalp und Säntis sind an Stelle der mittleren Geschwindigkeiten die medianen eingesetzt worden, da die Charakteristika der Durchgänge keine sinnvolle Anpassung einer Dispersionkurve erlaubten (vgl. Kap. 5.5.5). Für die anderen Durchgänge ist der Unterschied zwischen medianer und mittlerer Abstandsgeschwindigkeit auf Grund der niederen Peclet-Zahlen nie grösser als 8%, meist ca. 2 %. Die Abweichungen sind gering, insbesondere wenn man sich die grosse zeitliche Variation der Fliessgeschwindigkeiten mit wechselnder Quellschüttung vor Augen hält.

Der Vergleich mit Markierversuchen in anderen Karstgebieten (Tab. 12.2) zeigt, dass die Abstandsgeschwindigkeiten etwa im selben Bereich liegen, wobei die im Alpstein gefundenen Werte sogar noch etwas weiter streuen. MATTHESS (1983:224) gibt an, dass weitaus die meisten im Karst gemessenen Abstandsgeschwindigkeiten zwischen 18 und 360 m/h liegen, obwohl das Gefälle von 0.3 bis 50 % streut. Dies ist auf die Eigenheiten der Fliessverhältnisse zurückzuführen, es wechseln steile und flache Abschnitte, laminaire, turbulente oder gar schiessende Fliessbereiche.

Tab. 12.1:
Kennwerte der
Tracerdurchgänge

Einsele- stelle	Probe- stelle	Abstand (m)	Höhendiff. (m)	Gefälle (%)	Tracer	Menge (kg)	Einsel- datum	erstes Aufreten (Std.)	Maximum nach (Std.)	V_{max} (m/h)	V_{mit} (m/h)	V_{min} (m/h)	Ausbring- rate (%)	Dispersions- koeffizient (m ² /s)	Dispersions- länge (m)	V_{max}/V_{min}
Fälensee	Mühlbach Sennwald	5500	792	14	Rhodamin	8	4.7.86	22.7	33.7	199	144	163	95	2.1	51	1.40
Reslen	Schwendebach EW	1425	230	16	Naphthionat	20	16.7.86	6.9	9.9	206	119	143	80	.6	18	1.67
Reslen	Gätter- Fassung	1260	225	18	Naphthionat	20	16.7.86	6.8	9.3	187	117	136	5	.44	13	1.57
Seealpsee	Schwendebach EW	1475	250	17	Rhodamin	.02	22.7.86	8.7	16.7	170	42	89	(15)	2.7	232	(2.15)
Seealpsee	Gätter- Fassung	1210	245	20	Rhodamin	.02	22.7.86	8.2	14.2	148	48	85		1.8	135	
Schwader- loch	Brüelbach Pflanzenstiel	725	320	44	Uranin	1	1.7.86	60	65	12	10.8	11.1	105			1.11
Schwader- loch	Pflanzenstiel Fassung	725	320	44	Uranin	1	1.7.86	60	66	12	10.8	10.9				1.11
Oehrligrueb	Berndlibach Brücke	1875	930	50	Uranin	15	1.7.86	?	25.5	?	?	74	52			
Oehrligrueb	Tschuder Wasserauen	6075	1180	19	Uranin	15	1.7.86	90	108	68	55	56	19	.13	9	1.26
Ebenalp	Tschuder Wasserauen	1375	720	52	Eosin	10	1.7.86	37	61	37	20 ¹	23	102			1.85
Säntis	Thur Lau	4075	1410	35	Rhodamin	10	1.7.87	10	27	408	47 ¹	151	33			8.7
Risi	Dorfbach Alt St.Joh.	1550	395	25	Eosin	1	1.7.87	59	69	26	18	23	10 ²	.27	52	1.41
Risi	Müllibach Alt St.Joh.	1575	490	25	Eosin	1	1.7.87	55	81	29	18	20	18 ²	.25	49	1.51
Stein	Thur Unterwasser	2925	400	14	Naphthionat	30	1.7.87	30	47	98	54	62	12 ³	1.3	93	1.82
Stein	Dorfbach Alt St.Joh.	4850	425	9	Naphthionat	30	1.7.87	29	45	168	91	108	10 ³	2.6	116	1.98
Stein	Müllibach Alt St.Joh.	5175	420	8	Naphthionat	30	1.7.87	32	50	162	85	104	12 ³	2.9	126	1.88
Zwinglipass	Thur Unterwasser	6050	935	12	Uranin	5	1.7.87	19	24	327	195	257	24 ⁴	8.9	165	1.62
Zwinglipass	Dorfbach Alt St. Joh.	8050	960	12	Uranin	5	1.7.87	23	30	358	260	273	18 ⁴	3.2	44	1.43
Zwinglipass	Müllibach Alt St.Joh.	8375	955	11	Uranin	5	1.7.87	22	31	390	260	275	17 ⁴	4.2	59	1.54

¹ mediane Abstandsgeschwindigkeit
² total 65%
³ total 58%
⁴ total 85%

Tab. 12.2: Fliessgeschwindigkeiten von Markierversuchen in verschiedenen Karstgebieten (nach LEIBUNDGUT, GOSPODARIC 1986:282)

	v_{amax} (m/h)	v_{aint} (m/h)
Slowenien 1975 GOSPODARIC, HABIC (1976)	18-300	15-220
Neuenburger Jura 1979 MUELLER, ZOETL (1980)		15-250
Muotatal 1980 BOEGLI et al. (1981)	24-265	24-102
Peloponnes 1983 MORFIS, ZOJER (1986)	28-260	26-215
Alpstein 1986, 1987	12-408	11-275

Tragen wir die mittlere Abstandsgeschwindigkeit gegen die Distanz zwischen Einspeisungs- und Probenahmestelle auf (Abb. 12.1), lässt sich ein linearer Zusammenhang erkennen ($r=0.81$, Bestimmtheitsmass 65%). Der Beizug des Gefälles

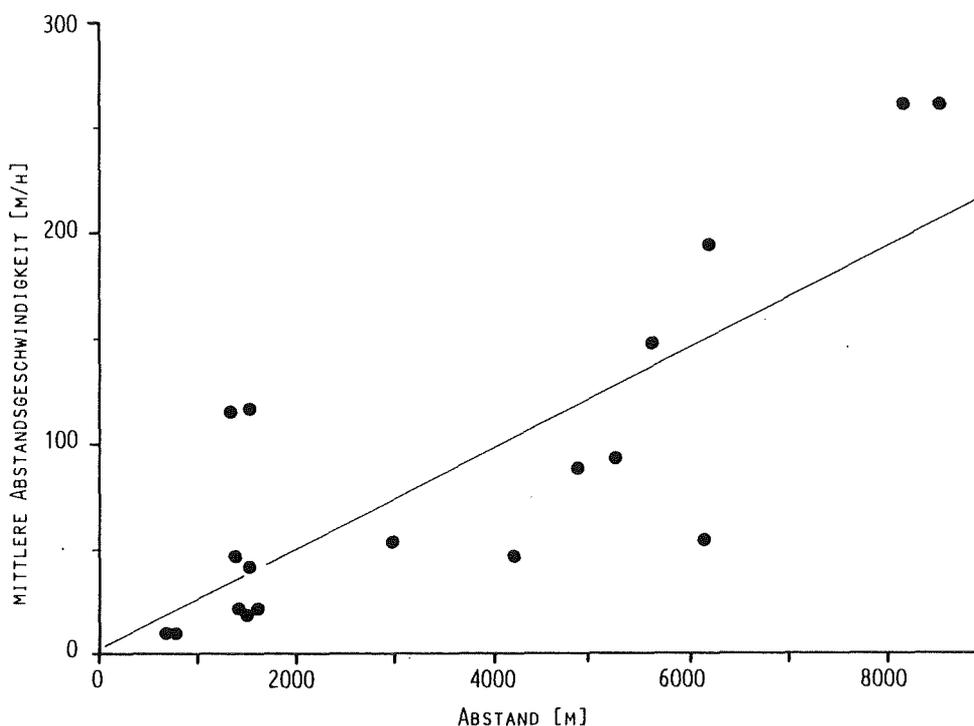


Abb. 12.1: Korrelation zwischen mittlerer Abstandsgeschwindigkeit und Abstand

in ein multiples Regressionsmodell bringt keine Verbesserung des Bestimmtheitsmasses. Die Distanzabhängigkeit der Abstandsgeschwindigkeit kann allenfalls mit dem hierarchischen Aufbau des Karstwassersystems erklärt werden: Hat der Markierstoff einmal das gut ausgebildete Hauptfliessnetz erreicht, fließt er rasch und direkt der Quelle zu. Der gefundene statistische Zusammenhang kann auf Grund der vorliegenden Daten nicht als allgemeingültig betrachtet werden. Die Datenbasis ist dazu zu schmal, zumal nicht alle Realisierungen im statistischen Sinne voneinander unabhängig sind.

Zur Beurteilung der zeitlichen Variabilität der Abstandsgeschwindigkeiten unter wechselnden hydrologischen Bedingungen liegen nur wenige Anhaltspunkte vor. Die in den Markierversuchen 1986 und 1987 ermittelten Geschwindigkeiten dürften im oberen Bereich liegen, da Anfang Juli die Schneeschmelze noch in vollem Gange ist. Für die hydrologische Verbindung Fälensee-Mühlebachquelle liegen Werte aus verschiedenen Jahreszeiten vor (Tab. 12.3).

Tab. 12.3: Abstandsgeschwindigkeiten vom Fälensee zu Mühlebach-Sennwald unter verschiedenen hydrologischen Bedingungen

Einspeisedatum	v_a int	v_a max
19. 6.1904*	-	208
6.12.1921*	15	18
4. 7.1986	163	199

* aus: ARBENZ(1923)

Die 1921 ermittelte Abstandsgeschwindigkeit ist also rund 11x geringer als die 1986 bestimmte. Aehnliche Unterschiede dürften auch bei den anderen hydrologischen Verbindungen vorliegen. Diesbezüglich wären weitere Untersuchungen sicher sehr interessant, da erst wenig Kenntnisse über die wechselnden Fliessgeschwindigkeiten in Karstwassersystemen vorliegen.

12.1.3 Dispersion

Wie bereits angeführt (vgl. Kap. 5.5.5) ist bei den herrschenden Fliessbedingungen in einem Karstwassersystem für die Form der Durchgangskurve nicht nur die hydrodynamische Dispersion verantwortlich. Vielmehr werden unter dem Anpassparameter D/vx sämtliche Faktoren, die die zeitliche Verteilung der Tracerkonzentration beeinflussen, subsummiert.

Es zeigte sich, dass keine optimale Anpassung von Dispersionskurven möglich ist. Alle gemessenen Kurven weisen im wesentlichen die gleichen Abweichungen von den theoretischen Kurven auf (vgl. Abb. 12.2):

- Anstieg steiler
- Spitze früher
- Abfall weniger steil

Als Ursache kommen folgende Punkte in Frage:

- reversible Adsorption
- Diffusion in Nebenklüfte und Matrix
- Tracerfluss zu vorübergehend immobilem Wasser
- Turbulentes Fliessen

Die reversible Adsorption hat für die Tracer Uranin, Eosin und Naphthionat bei Einspeisungen in eine aktive Karstschwinde wohl eine untergeordnete Bedeutung.

Die Diffusion führt zu einer Veränderung der Charakteristik der Tracerdurchgangskurven. Die Diffusion kann in Kluftmodellen auch berücksichtigt werden (MALOSZEWSKI 1985). Die Diffusionskonstanten einiger Tracer sind aber unbekannt. Für die Anwendung in Karstgebieten ist zudem der hierarchische Aufbau von Karstwassersystemen mit stark wechselnden Kluftbreiten hinderlich.

Der Tracerfluss zu vorübergehend immobilem Wasser hat in den Kluftsystemen bei den turbulenten Fliessverhältnissen eine gewisse Bedeutung und führt zum flachen Auslaufen der Tracerdurchgangskurve.

Das turbulente Fliessen dürfte mutmasslich zum steilen Anstieg führen. Darauf deutet auch die Tatsache, dass bei den Durchgängen mit maximalen Abstandsgeschwindigkeiten unter 100 m/h und mittleren Geschwindigkeiten unter 60 m/h

eine bessere Anpassung von Dispersionskurven möglich ist. Eine mathematische Untermauerung dieser Vermutung ist mit den vorhandenen Kenntnissen über die Fließverhältnisse nicht möglich (vgl. Kap. 4.2).

Der Dispersionskoeffizient D_L ist geschwindigkeitsabhängig, deshalb ist v.a. die Dispersionslänge (Dispersivität) als Aquiferparameter interessant. MATTHESS (1983:138) gibt für Kluft- und Karstgesteine eine beobachtete Größenordnung von 10-1000 m an. Diese Werte sind wahrscheinlich mit dem Summenkurvenverfahren bestimmt worden. LENDA, ZUBER (1970:635) erwähnen für Kluftgesteine den Wertbereich 2-100 m. Für den Vergleich mit Werten aus anderen Gebieten muss unbedingt das Auswerteverfahren berücksichtigt werden. In vielen Arbeiten wurden Dispersionskoeffizient und Dispersionslänge mit dem Summenkurvenverfahren ermittelt. Dieses liefert bei den Durchgängen im Alpstein bis zu zehnmal höhere Dispersionslängen.

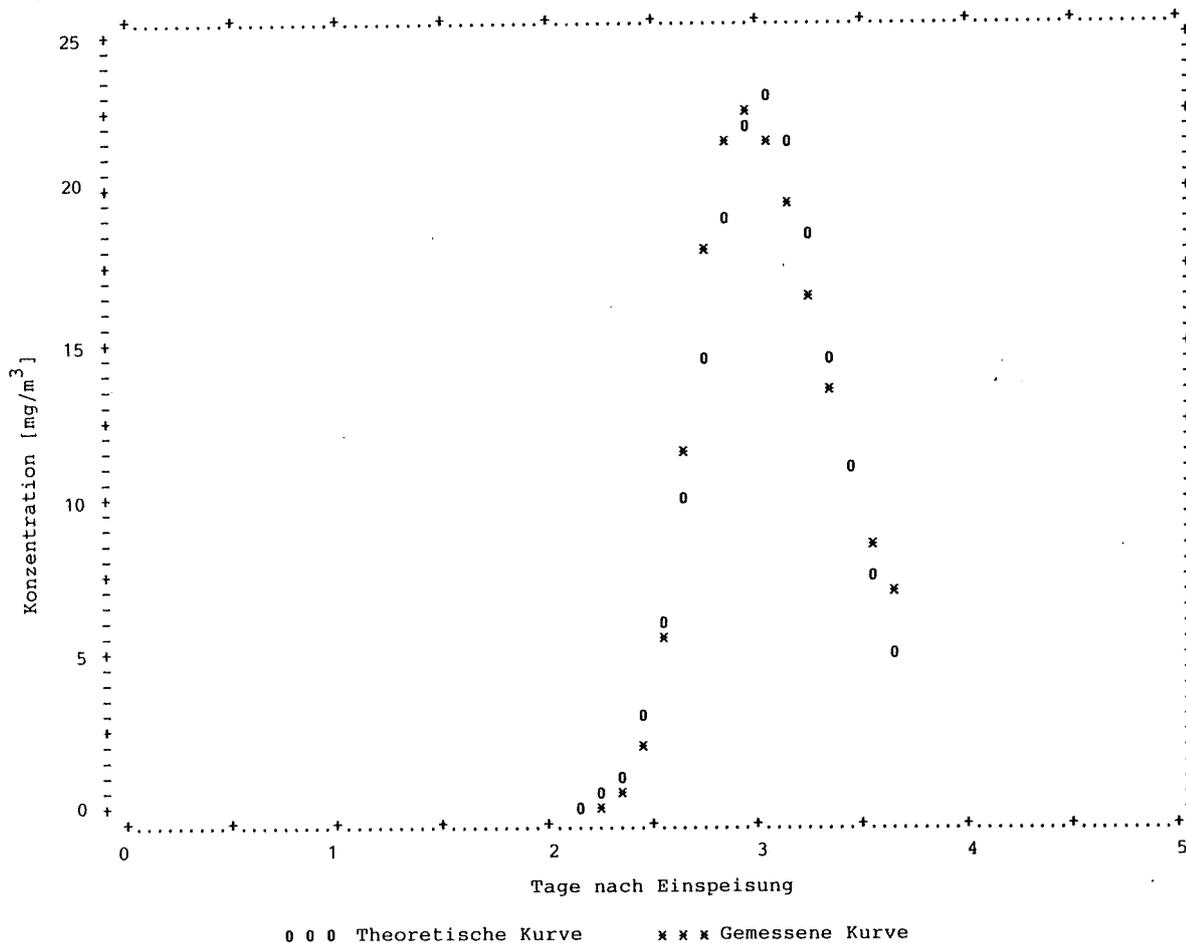


Abb. 12.2: Abweichung der gemessenen Tracerdurchgangskurven von Dispersionskurven

Allgemein nimmt man an, dass die Dispersionslänge von den hydrologischen Eigenschaften des Aquifers bestimmt wird, obschon eine gewisse Distanzabhängigkeit beobachtet werden kann (MATTHESS 1983:138). In Analogie zu den porösen Medien kann angenommen werden, dass die Dispersionslänge mit grösseren Kluftweiten und geringerer Rauigkeit abnimmt. In die bestimmten Dispersionslängen gehen aber wie angeführt auch die Einflüsse von Turbulenz und Diffusion mit ein. Eine Interpretation als Aquiferparameter bleibt somit illusorisch. Die Dispersionslängen bleiben deskriptive Parameter der Form der Durchgangskurven. Die Untersuchungen zeigten weder eine Distanz- noch eine Geschwindigkeitsabhängigkeit dieses Parameters.

12.2. Abgrenzung der Einzugsgebiete

Die in der "Hydrogeographischen Karte des Alpsteins" (Beilage) abgegrenzten Einzugsgebiete sind mit Hilfe folgender Kenntnisse abgegrenzt worden:

Markierversuche:

Sie lieferten punktuelle Ergebnisse über hydrologische Verbindungen.

Abflussmengen:

Die Abflussmengen erlaubten eine Abschätzung der Einzugsgebietsflächen der einzelnen Quellen.

Geologische Strukturen und allgemeine Fliessrichtung:

Die allgemeinen Erkenntnisse über die Fliessverhältnisse, die im vorangehenden Kapitel dargestellt sind, zeigten eine Abhängigkeit der Entwässerungsrichtung von den geologischen Strukturen.

Topographie:

Die Gefällsverhältnisse erlauben eine Abgrenzung der potentiell möglichen Einzugsgebietsfläche.

Die Abgrenzung der Einzugsgebiete musste parallel mit der Bestimmung der Abflussspende und der Berechnung der Einzugsgebietsgrösse (Kap. 8.2) erfolgen, da sich Abgrenzung und Fläche wegen der variablen Abflussspende gegenseitig beeinflussen. Weil der Wertebereich der mittleren

Einzugsgebietshöhe und der Einzugsgebietsfläche relativ eng begrenzt ist, und die mittels einer Regressionsbeziehung ermittelte Abflusssspende nur eine begrenzte Genauigkeit aufweist, wurde auf ein aufwendiges Bestimmungsverfahren (z.B. mittels digitalem Geländemodell) verzichtet. Die Anpassung ist in einigen wenigen Bearbeitungsschritten vollzogen worden.

Die Einzugsgebietsgrenzen können nicht als scharfe Trennlinien verstanden werden. In Karstgebieten sind Einzugsgebietsgrenzen kaum scharf zu ziehen, da sie je nach hydrologischen Verhältnissen etwas anders liegen können. Ein zweiter Grund der Unschärfe liegt in den verfügbaren Daten, die den Abgrenzungen zu Grunde liegen. Für konkrete Anwendungen muss daher in Grenzgebieten mit einem Abfließen in zwei oder mehr Richtungen gerechnet werden. Allenfalls sind je nach Fragestellung auch zusätzliche Markierversuche nötig.

Einzugsgebietsabgrenzungen erfolgten nur im untersuchten regionalen Massstab. Die Einzugsgebiete kleinerer Quellen, die dem regionalen Karstwassersystem aufsitzen (vgl. Abb. 12.3) und deren Quellwasser wieder versickert oder der oberflächlichen Entwässerung zufließt, sind nicht ausgeschlossen.

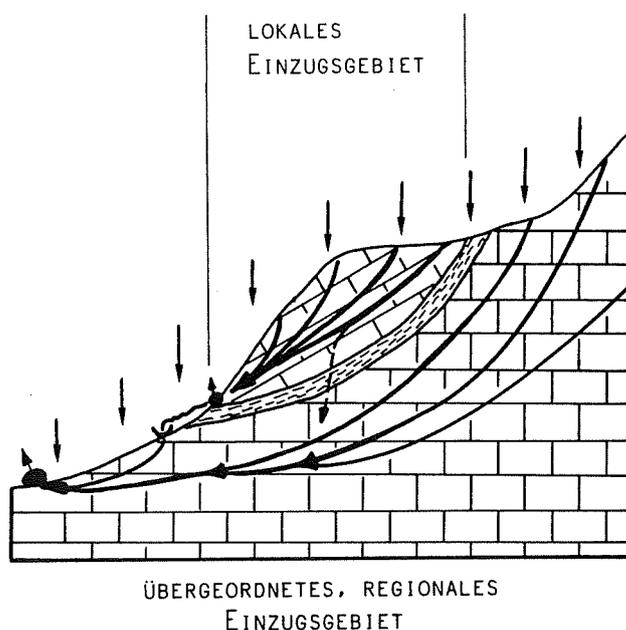


Abb. 12.3: Regionale und lokale Karstwassersysteme

Die vorliegenden Daten weisen darauf hin, dass nur die Randbereiche der Säntisdecke ins Rheintal und nach Nordwe-

sten in die subalpine Molasse entwässern. Einzugsgebietsüberschneidungen sind im Gebiet der Oehrligrueb und beim Säntisersee nachgewiesen. Sehr stark miteinander verhängt sind die Einzugsgebiete auf der Toggenburgerseite. Die beiden Einzugsgebiete kreuzen sich im Gebiet zwischen Lauiboden und Unterwasser. Durch die hydrologische Verbindung Säntis-Milchbach (bei Starckenbach) ist auch nachgewiesen, dass das nach zwei Seiten offene Einzugsgebiet nördlich des Einzugsgebietes der Quellen von Alt St. Johann durchzieht.

12.3. Vorgehen zur Beurteilung von Quellen und Einzugsgebieten

12.3.1 Strukturmodelle von Quelleinzugsgebieten

Um eine verständliche, aber doch umfassende Präsentation der hydrologischen Kenntnisse der Quellen und ihrer Einzugsgebiete zu ermöglichen, wurden diese modellhaft dargestellt. Die Modelle sind auf der "Hydrogeographischen Karte des Alpsteins" (Beilage) zu finden. "Die Modellbildung schafft idealisierte Darstellungen der Wirklichkeit, um bestimmte ihrer Eigenschaften zu demonstrieren. Modelle werden notwendig durch die Komplexität der Wirklichkeit. Es sind Begriffstützen für unser Verständnis; sie liefern als solche ein vereinfachtes und anscheinend verständiges Bild zum Lernen und bieten eine Grundlage, um Hypothesen für die Forschung auszuarbeiten. Sie vermitteln nicht die ganze Wahrheit, aber doch einen nützlichen Teil davon" (HAGGETT 1972, in: KLUG, LANG 1983:42).

Auf Grund der Komplexität natürlicher Systeme, die erst teilweise erfasst werden können, müssen wir uns bei der Modellbildung auf die bekannten Sachverhalte beschränken. Der Kenntnisstand im Alpstein erlaubt hier erst sehr grobe Vorstellungen, die im folgenden von einigen Quellen in Form von Strukturmodellen dargestellt werden. KLUG, LANG (1983:167) liefern folgende Definition für Strukturmodelle: "Graphische Darstellungen des Beziehungsgeflechtes eines Geosystems oder eines Teils desselben, in dem dessen Elemente inhaltlich gekennzeichnet sowie deren gegenseitige Korrelationen, Abhängigkeiten sowie Input-Output-Relationen abgebildet werden."

Die Strukturmodelle der Quellen, die dem heutigen Kenntnisstand entsprechen und die nach allfälligen zusätzlichen Untersuchungen weiter detailliert werden können, bilden eine Grundlage für die Beurteilung der Quellen. Die Strukturmodelle könnten bei weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen der Quellen allenfalls die Grundlage für eine mathematische Modellierung auf Grund eines Konzeptmodells sein.

In den Modellen sind die einzelnen Abflussanteile aufgezeichnet, die Strichbreite ist proportional der mittleren jährlichen Flussmenge, die abgeschätzt wurde. Bei allen Modellen ist für den Gesamtinput bzw. -output die gleiche Breite gewählt worden, die dem mittleren Jahresabfluss der Quelle entspricht. Diese Vorgabe war nötig, weil die Schüttungen zu unterschiedlich sind, um immer den gleichen Massstab zu wählen. Als Input wird der effektive Niederschlag verwendet. Nach MATTHESS, UBELL (1983:273) verstehen wir darunter den Anteil des Niederschlags, der Abfluss erzeugt. Der Verdunstungsanteil ist also bereits abgezogen. Es wird nur der Input ins Karstwassersystem berücksichtigt. Dieser Input kann deshalb gleich dem Output gesetzt werden, wenn wir den Einfluss einer Änderung des Speicherinhalts vernachlässigen. Wir vereinfachen damit die Wasserhaushaltgleichung:

$$\begin{aligned} \text{Niederschlag} &= \text{Abfluss} + \text{Verdunstung} + \text{Änderung des Speicherinhalts} \\ \longrightarrow \text{effektiver Niederschlag} &= \text{Abfluss.} \end{aligned}$$

Die Grösse, der in den Modellen eingezeichneten Speicher, kann auf Grund der vorliegenden Daten nicht abgeschätzt werden. Die dargestellte Grösse ist daher nicht proportional zu der realen Speichergrösse.

12.3.2 Ablaufschema der Beurteilung

Ein allgemein anwendbarer Ablauf einer Quellbeurteilung ist in Abbildung 12.4 dargestellt. Aus den Untersuchungen der Wasserbeschaffenheit kann die aktuelle Belastung der Quelle bestimmt werden. Schwellen- und Grenzwerte und damit auch Belastungsgrenzen, Belastbarkeit und Beurteilung richten sich nach dem vorgesehenen Verwendungszweck.

Die Gegenüberstellung von aktueller Belastung und Belastungsgrenze ergibt die Belastbarkeit. Auf Grund der hydrologischen Beurteilung kann diese Be-

lastbarkeit räumlich differenziert werden. Dieser Belastbarkeit wird die Gefährdung gegenübergestellt. Diese ergibt sich aus der Beurteilung der allgemeinen Entwicklung oder möglicher Schadenereignisse im Einzugsgebiet. Bei Nutzungsintensivierung oder Sanierungsmassnahmen im Einzugsgebiet kann sich aus dieser Beurteilung auch eine abnehmende Belastung ergeben.

Die Gegenüberstellung von Belastbarkeit und Gefährdung (durch eine potentielle Belastung) erlaubt die Quellbeurteilung bezüglich Quantität und Qualität. Bei der Qualität muss der chemisch-physikalische und der bakteriologische Aspekt auseinandergehalten werden. Daraus lassen sich dann die Empfehlungen zum Schutz der Quellen ableiten.

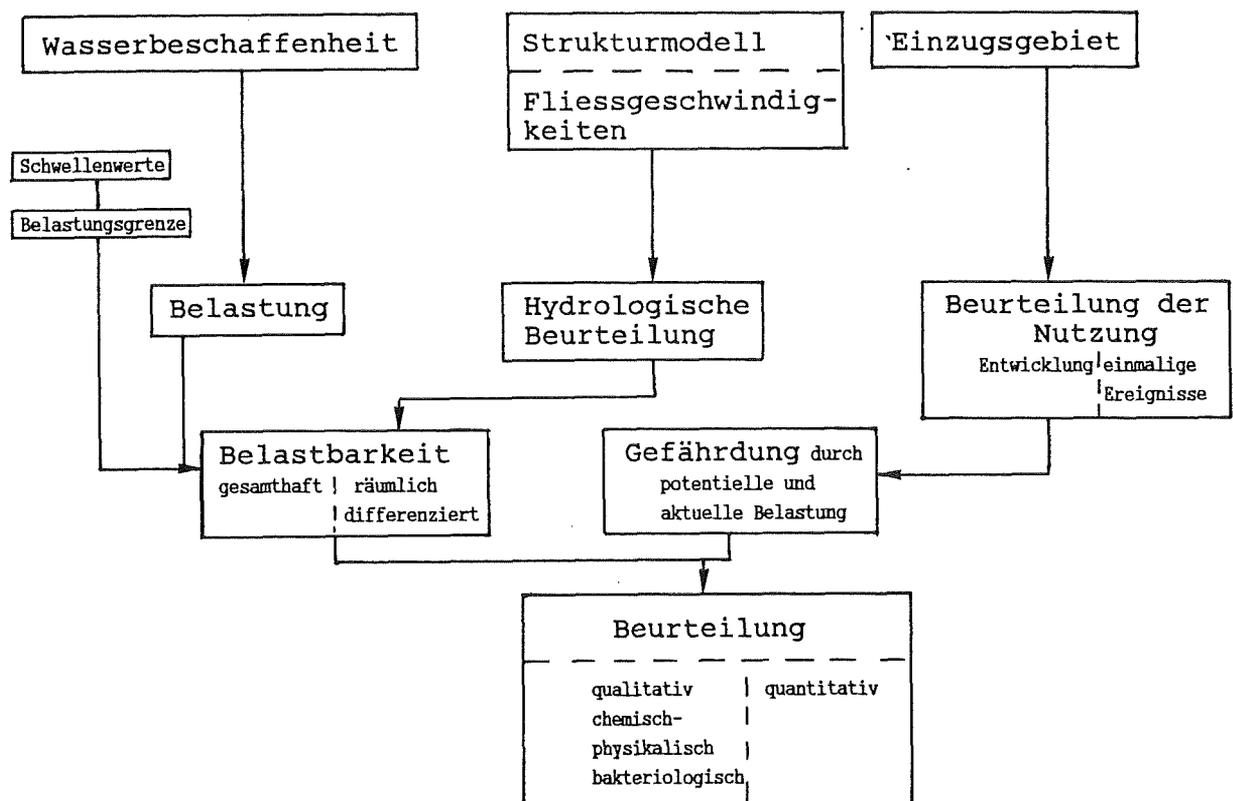


Abb. 12.4: Ablaufschema der Beurteilung von Quellen

FELBER (1982) hat für Grindelwald ein Verfahren zur Beurteilung von Quellen angewendet, das auf einer Raumgliederung beruht. Er konnte für die Quelleinzugsgebiete homogene Teilräume ausscheiden, deren hydrologische Eigenschaften halbquantitativ beurteilt werden konnten. Wegen der für Karstgebiete typischen Heterogenität ist dies für

den Alpstein nicht möglich. Bodenbildung, Vegetation, Lithologie und Klüftung, alles Grössen die entscheidend Infiltration und Filterkraft beeinflussen, wechseln äusserst kleinräumig. Mit dem Wechsel von Bodenbedeckung und Vegetation ändert aber auch die Nutzung auf kurze Distanz. Ein kleinkariertes Mosaik von Teilräumen kann aber nicht Grundlage für eine Beurteilung und allenfalls Schutzmassnahmen sein. Da die Nutzung in einem alpinen Gebiet extensiv und räumlich begrenzt ist, wurde für die Beurteilung ein pragmatisches Vorgehen gewählt. Das Augenmerk wurde auf sich abzeichnende Konflikte gerichtet. Das Ablaufschema dient zur Strukturierung der Beurteilung. Es wird aber auf ein analytisches Vorgehen verzichtet. Beim analytischen Vorgehen wird das "Ganze" in die einzelnen Teile des Beurteilungsablaufes (Abb. 12.4) aufgesplittert, dabei wird viel Detailwissen produziert (BECHMANN 1981:123), das aber im vorliegenden Fall keine sinnvoll einsetzbaren Ergebnisse beinhaltet. Bei konkreten Fragestellungen im lokalen Massstab müssten diese Grundlagen im regionalen Massstab des Alpsteins zu grob bleiben, da Karstwassersysteme äusserst heterogen aufgebaut sind. In extensiv genutzten Gebieten stellt sich ohnehin die Frage nach dem Sinn einer flächendeckenden Beurteilung. Es lassen sich aber doch Bereiche erkennen, die ein besonderes Augenmerk verlangen:

- Einzugsgebiete aktiver Schwinden oder Dolinen
- Gebiete mit intensiverer Nutzung

Im ersten Fall bedeuten wegen der verminderten Belastbarkeit bereits geringste Belastungen eine Gefahr für das Karstwassersystem. Im Fall intensiverer Nutzung muss lokal oder punktuell mit erhöhten Belastungen gerechnet werden.

12.4. Allgemeine Beurteilung von Karstquellen im Alpstein

Die allgemeine Beurteilung der Karstquellen im Alpstein folgt dem Schema in Abbildung 12.4. Aus der Beurteilung und aus Erfahrungen aus anderen Karstgebieten ergeben sich einige grundsätzliche Schlussfolgerungen zu Schutz und Nutzung von Karstwasser. Grundsätzlich muss damit gerechnet werden, dass sich Belastungen im Einzugsgebiet unmittelbar bei den Quellen feststellen lassen, da von allen Punkten des Einzugsgebietes über ein gut ausgebildetes Kluftsystem eine direkte Verbindung zu den Quellen be-

steht. Eine gewisse Filterkraft besteht allenfalls durch eine gut ausgebildete Bodendecke und nicht durch das Karstwassersystem selbst.

Eine grössere quantitative Beeinflussung des Karstwassersystems durch anthropogene Eingriffe besteht heute nur durch die Wasserkraftnutzung am Seealpsee. Neue, bedeutende quantitative Beeinflussungen sind im Augenblick nicht abzusehen. Die Frage müsste aber allenfalls im Zusammenhang mit möglichen neuen Kleinwasserkraftwerken abgeklärt werden. Studien dazu liegen nur für zwei Anlagen im oberen Toggenburg vor (BWW 1984).

Die chemische Beschaffenheit bietet im Alpstein im allgemeinen keine Schwierigkeiten. Die Verschmutzungsindikatoren Chlorid und Nitrat zeigen durchwegs niedrigere Werte, die ungefähr der natürlichen Belastung entsprechen (vgl. Kap. 9). Dies dürfte sich auch bei leicht zunehmender Belastung nicht stark ändern, zudem ist die Belastbarkeit hoch. Der chemische Aspekt kann aber im Zusammenhang mit Schadereignissen sehr rasch zu Problemen führen. Deshalb ist ein Augenmerk auf mögliche Schadereignisse und deren Folgen zu richten. Zu Denken ist insbesondere an den Umgang mit Haushalt- und Bauchemikalien, sowie an Transport und Lagerung von Treibstoffen (Öl, Benzin).

Von den physikalischen Aspekten bietet in Karstwässern immer wieder die Trübung Schwierigkeiten. Bei Hochwasser werden im Karstwassersystem abgelagerte Sedimente mitgespült, z.T. auch von der Oberfläche eingespülte Schwebstoffe. Dies erfordert eine kontinuierliche Ueberwachung der Trübung.

Die grössten Schwierigkeiten in den Karstwässern bietet der bakteriologisch-hygienische Aspekt. Die oft kurze Aufenthaltszeit des Wassers im Aquifer erlaubt keinen oder nur einen geringen Abbau von eingetragenen humanopathogenen Bakterien und Viren. Sie können allenfalls in kleinen Klüften zurückgehalten oder am Höhlenlehm adsorbiert werden (MISEREZ, SIMEONI 1973:27). Bei allen Quellen ist deshalb mindestens periodisch mit einer hygienischen Beeinträchtigung zu rechnen. Da diese unvermittelt eintritt, muss in der Regel eine dauernde Wasseraufbereitung vorgesehen werden (BUS 1982:11). Die Belastungsgrenzen sind für diesen Aspekt überschritten, die Belastbarkeit ist negativ. Weitere Belastungen sind zu vermeiden. Für die punktuellen Belastungen von gut besuchten Unterkünften und Gaststätten ist deshalb eine geeignete Lösung des

Abwasserproblems im Hinblick auf die hygienische Belastung dringend nötig und z.T. bereits realisiert. Die hygienische Gefährdung durch anfallenden Klärschlamm darf dabei nicht unterschätzt werden. Allfällige Ausbringflächen und -zeiten erfordern eine sorgfältige Abklärung. Der Transport des Klärschlammes ins Tal ist die beste Lösung. Bei der Alpwirtschaft muss darauf geachtet werden, dass kein Dünger in der Nähe von Schwinden und auf Stellen mit geringmächtiger oder fehlender Bodenbedeckung ausgebracht wird. An diesen Stellen dürfte die Düngung sowieso nur einen geringen Ertrag bringen.

Die Nutzung von Karstquellen für die Trinkwasserversorgung wird recht verschieden beurteilt und nicht selten überhaupt abgelehnt (ZOETL 1974:251). Dies führte vielerorts, z.T. auch im Alpstein zum Ausweichen auf die Nutzung von Porengrundwasser. Andererseits ist aber bewiesen, dass auch völlig einwandfreie Trinkwasserversorgungen auf der Basis der Nutzung von Karstwasser möglich sind. Hingewiesen sei hier nur auf die Karstwasserversorgungen der grossen österreichischen Städte Wien, Salzburg und Innsbruck. Von besonderer Bedeutung ist in Karstgebieten aber die Ausscheidung von Schutzgebieten (ZOETL 1974:252). Bei der Ausscheidung von Schutzzonen gilt es zu beachten, dass die Gefahr für das gefasste Wasser häufig nicht mit zunehmender Entfernung des Gefahrenherdes abnimmt. Dies kann die Ausscheidung von nicht zusammenhängenden Schutzzonen erfordern, da insbesondere Schwinden und andere Versinkungsbereiche zu schützen sind (BUS 1982:18). Eine besondere Beachtung verdienen in Karstgebieten auch mögliche Verunreinigungen in der Folge von Schadenereignissen (z.B. Unfälle).

In den folgenden Abschnitten über die einzelnen Quellen steht die Gefährdung im Vordergrund, da die Belastbarkeit der Quellen überall ungefähr den obigen Ausführungen entspricht. Besonders gering ist die Belastbarkeit im unmittelbaren Einzugsgebiet aktiver Schwinden, wo ein steter Wasserfluss eine direkte Verbindung zum Karstwassersystem bildet. Die Beurteilung der Nutzung im Hinblick auf Entwicklung und einmalige Schadenereignisse erfolgte auf Grund der Einzugsgebiete, der Strukturmodelle und den Fliessgeschwindigkeiten. Es fliesst also auch die hydrologische Beurteilung des Karstwassersystems mit ein. Für die Entwicklung rechnen wir, wie bereits im Kapitel 12.3.1 angeführt, mit einer massvollen Entwicklung des Sommertourismus und einer stabilen Alpwirtschaft.

12.5. Beurteilung ausgewählter Quelleinzugsgebiete

12.5.1 Gätteri-Wasserauen und Schwendebach

Die Gätteriquellen liegen auf der orographisch linken Seite und im Bachbett des Schwendebaches 500 m südwestlich des EW. Zwei Austritte sind gefasst, einer dient der Wasserversorgung von Appenzell. Die deutlich erkennbaren Austritte liegen nicht mehr als 50 m auseinander.

Das Einzugsgebiet liegt im Gebiet Seealp-Mesmer-Meglisalp. Von den Einspeisungen auf der nördlichsten Kette (Oehrli-grueb, Ebenalp) konnte kein Markierstoff im Einzugsgebiet der Gätteriquellen nachgewiesen werden. Hier ist eine deutliche Grenze vorhanden. Aus dem Gebiet Meglisalp fliesst ein bedeutender Teil des Wassers oberirdisch der Seealp zu. Der grösste Teil des Wassers aus dem Einzugsgebiet fliesst durch den Seealpsee, der damit eine wichtige Funktion als Zwischenspeicher ausübt, die auch vom EW genutzt wird. Durch Messungen konnte nachgewiesen werden, dass der Seealpsee einen bedeutenden unterirdischen Zufluss aufweist, wo Wasser aus den höher gelegenen Teilen des Einzugsgebietes über ein Karstwassersystem zufliesst. Vom See fliesst das Wasser direkt über die Seeschwinde oder über den oberirdischen Abfluss und die Schwinde bei Reslen den Gätteriquellen zu. Bei Niederwasser ist auch wiederaustretendes Seewasser unterhalb der Gasthäuser erkennbar, das von einem unterirdischen Seeabfluss (im Seezapfen) gespiesen wird. Im weiteren entnimmt das EW Wasser direkt aus dem See. Uebersteigt der oberirdische Abfluss das Schluckvermögen der Schwinden, führt der Schwendebach durchgehend Wasser. Ein Teil der Quellaustritte liegt dann im Bachbett und ist nicht mehr klar erkennbar. Wenn der Bach bei den Quellen kein Oberwasser führt (d.h. das Bachbett zwischen Reslen und Gätteri trocken ist), schüttet die Quellgruppe rund 220 l/s. Die Schüttung fällt aber nicht unter 90 l/s. Das Bachbett zwischen Reslen und Gätteri liegt während rund 220 Tagen im Jahr trocken.

Das Schüttungsverhalten bestätigte auch die mit Markierversuchen nachgewiesene direkte Verbindung zum See bzw. zu den knapp unterhalb liegenden Versickerungsstellen bei Reslen:

- Nach dem Aufstau des Sees am 2. August 1985, als für einige Zeit kein Seeüberlauf bestand, sank die Quellschüttung in der Fassung rasch von 45 l/s auf 14 l/s ab. Dies bestätigt die Verbindung zu den Versickerungstellen unterhalb des Sees.
- Nach längeren Trockenzeiten im Herbst bleibt die Quellschüttung (Station Schwendebach-EW) auf 90 l/s und sinkt nicht weiter ab. Dies ist nur wenig mehr als die Abflussmenge bei der Schwinde im Seealpsee, deren Abflussmenge von rund 70 l/s wegen ihrer Tiefe (10m) nur wenig schwankt. Die Rezessionsanalyse ergab ein ausfliessbares Speichervolumen für die Station Schwendebach-EW, das relativ hoch ist und 2/3 des Seevolumens entspricht.

Daraus ergeben sich die Gefahrenherde für die Gätteriquellen und den Schwendebach. Eine zentrale Stelle ist der Seealpsee und seine Umgebung. Verunreinigungen des Sees müssen direkte Auswirkungen auf die Quellwasserqualität mit sich bringen. Ein heikler Punkt sind die Alphütten im Bereich der Schwinden bei Reslen. Im unmittelbaren Schwindenbereich bedeuten tierische Exkremente und andere Stoffe, die von einer Bodendecke und entsprechender Vegetation ohne weiteres aufgenommen werden, eine grosse Gefährdung. Im Seealpgebiet sind unbedingt geeignete Schutzmassnahmen nötig.

Ein besonderes Augenmerk verdient auch die schwierig befahrbare und steile Strasse zum Seealpsee. Bei allfälligen Unfällen kann die Gätteriquelle direkt in Mitleiden-schaft gezogen werden.

Die Meglisalp ist ein weiterer Bereich im Einzugsgebiet, wo eine Gefährdung durch touristische Nutzung besteht. Die Seewerkalkmulde auf der die Meglisalp liegt, scheint gegen unten abgedichtet, was zu einem Oberflächenabfluss über die Steilstufe Richtung Seealp führt. Eine Belastung dieses Baches muss vermieden werden. Bei einer Ausbringung/Ableitung von geklärtem Abwasser muss untersucht werden, ob dieses trotz Bodenschicht und Abdichtung nicht irgendwo ins Karstwassersystem gelangt.

Im Ueberblick muss gesagt werden, dass das Karstwassersystem der Gätteriquellen äusserst empfindlich ist und eine sorgfältige Abklärung von Schutzmöglichkeiten verlangt. Die Nutzung der Quelle während Alp- und Wanderzeit ist auf jeden Fall heikel. Bei allfälligen Verschmutzungen ist nicht nur die Quelle und damit die Wasserversorgung be-

troffen. Je nachdem kann auch der Schwendibach direkt gefährdet sein.

12.5.2 Tschuder-Wasserauen

Der Tschuder bei Wasserauen liegt ca. 40 m über dem Talboden. Die Quelle weist sehr grosse Schüttungsschwankungen auf und kann trocken fallen. Dabei wird ein kleiner Teil eines Höhlensystems zugänglich, das im Kieselkalk liegt. Die Lage und die Charakteristik der Quellschüttung deuten auf eine Ueberlaufquelle mit einem beträchtlichen, am Hauptaustritt nicht ausfliessbaren Speichervolumen hin. Jedenfalls blieb der Versuch von M.Fischer den Wasserspiegel künstlich abzusenken erfolglos. Am Hangfuss sind einige Austritte, die einen perennierenden Basisabfluss bilden.

Die Markierversuche zeigten eine klare Abgrenzung zum Einzugsgebiet der Gätteriquellen. Es zieht sich auf der nördlichsten Kette weit nach Westen und ist z.T. nach Norden offen. In der Oehrligrueb schneidet sich das Einzugsgebiet des Tschuders mit jenem des Berndlibaches (Quellen im Dunkelberndli), der nach Norden in die subalpine Molasse entwässert.

Offensichtlich fliesst das Wasser aus dem hoch gelegenen Einzugsgebiet durch gut ausgebildete, vertikale Klüfte sehr rasch zur Quelle. Neben den Gasthäusern bedeutet auch die mindestens im Frühsommer aktive Schwinde in der Oehrligrueb bei Verunreinigung eine Gefährdung. Die Lage der Schwinde macht aber eine Belastung eher unwahrscheinlich. Das Gebiet Bommen mit seinen zahlreichen Dolinen und alpwirtschaftlicher Nutzung muss als bedeutender Gefahrenherd der Quelle angesehen werden. Der Tschuder wird zwar nicht für die Trinkwassergewinnung genutzt. Aber im Hinblick auf die Fischzucht und den Schwendebach sind doch Verunreinigungen und permanente Belastungen zu vermeiden. Zudem versickert ein Teil des Abflusses nachweislich im Grundwasser (vgl. Kap. 10.4.4). Eine direkte Verbindung zum Grundwasserpumpwerk konnte aber nicht festgestellt werden.

12.5.3 Brüelbach-Pfannenstiel

Die Quelle am Schluchtausgang des Brüeltobels unterhalb der Strasse ist für die Trinkwasserversorgung des Bezirkes Rüte gefasst. Da sie bei Niederschlägen rasch trüb wird, fliesst ihr Wasser im Sommerhalbjahr oberhalb der Abflussmessstation in den Brüelbach. Weitere Quellen treten im Brüeltobel aus.

Auf der Hydrogeographischen Karte (Beilage) ist das Einzugsgebiet bezogen auf die Messstation Brüelbach-Pfannenstiel ausgeschieden worden. Dieses Einzugsgebiet wurde mangels Daten nicht weiter aufgegliedert. Die Markierversuche zeigten deutlich, dass die Quellen im NW-Schenkel des Alp-Sigel-Gewölbes beim Schluchtausgang und jene im Gewölbekern in der Schlucht aus einem anderen Einzugsgebiet gespiesen werden. Für die Pfannenstielquelle ist die Speisung aus dem Gebiet Schwaderloch und Säntisersee durch Markierversuche nachgewiesen. Für die anderen Quellen kommen Teile von Alp Soll, Alp Sigel und dem Brüeltobel in Frage.

Die Abflussmengen des Brüelbachs zeigen jedenfalls deutlich, dass das Einzugsgebiet relativ klein sein muss, und die Pfannenstielquelle für die Entwässerung des Alpsteins eine untergeordnete Rolle spielt. Im Strukturmodell, das nur die Pfannenstielquelle betrifft, ist für die Pfannenstielquelle eine geschätzte mittlere jährliche Schüttung von 50 l/s eingetragen, was einem Einzugsgebiet von 1,2 km² entspricht. Wegen der kleinen Schüttung liefert auch die an sich geringe Wassermenge, die im Schwaderloch versickert, einen ansehnlichen Anteil. Entsprechende Schutzmassnahmen in diesem Bereich sind deshalb vordringlich. Beim Säntisersee ist ein Schutz auch aus ästhetischer Sicht sinnvoll. Wie gross der Seewasseranteil am Quellwasser ist, kann nicht genau bestimmt werden. Die Quellcharakteristiken, insbesondere der Gang der Temperatur, deuten auf einen geringen Anteil. Offen bleibt die Frage, zu welchen Quellen die geklärten, versickerten Abwässer des Plattenbödels fliessen. Es muss mit einem Abfluss ins Einzugsgebiet Brüelbach-Pfannenstiel gerechnet werden.

Im Brüeltobel bildet die Strasse eine zu beachtende Gefahrenquelle, auch im unmittelbaren Fassungsbereich. Trotz der in Karstgebieten bedeutenden Gefährdung über grosse Distanzen, darf der Schutz des Fassungsbereichs nicht vernachlässigt werden.

Da die Quellen im Brüeltobel nicht direkt durch den Abfluss aus den Schwinden Schwaderloch und Sämtisersee gespeisen werden, wäre zu prüfen, ob sich diese nicht für eine Nutzung besser eignen würden. Hinderlich sind dabei natürlich die Erschliessungskosten.

12.5.4 Mühlebach-Sennwald

Die Mühlebachquelle tritt auf 670 m ü.M. am oberen Ende des Schuttkegels bei Sennwald aus. Die Quelle liegt in der Nähe einer grossen Bruchverschiebung. In diesem Querbruch ist der Valanginiankern des Gewölbes, aus dessen Kalk die Quellen entspringen, angeschnitten (ARBENZ 1923:50). Der tiefste Quellaustritt, der nie versiegt, ist für das EW Sennwald gefasst. Höher liegende Austritte springen bei Hochwasser an. Mit dem gleichen Karstwassersystem in Verbindung steht offenbar auch der Bofelbach rund 1 km nordöstlich. Weiter südlich sind zum Rheintal hin keine grösseren Karstquellen bekannt.

Im Einzugsgebiet der Mühlebachquelle liegen Fälensee und Sämtisersee. Dies führt zu ähnlich grossen Temperaturschwankungen des Quellwassers wie bei der Gätterli-Wasser-aue. Ein beträchtlicher Teil des Quellwassers durchfliesst offensichtlich die beiden Seen. Die variablen Seevolumenta (grosse Spiegelschwankungen) üben eine ausgleichende Funktion auf die Quellschüttung aus. Bei hoher Wasserführung fliesst das Wasser sehr schnell der Mühlebachquelle zu. Bei Niederwasser wurde vom Fälensee zur Quelle eine rund 11x geringere Fliessgeschwindigkeit gemessen. Die Quelle wird wegen den hygienischen Schwierigkeiten auch nicht mehr für die Trinkwasserversorgung von Sennwald verwendet. Die Markierversuche zeigten, dass auch der Bofelbach rund 500 m NE Wasser aus dem Fälensee führt.

Die grössten Gefahrenherde für die Quelle liegen im Bereich der beiden stark frequentierten Seen. Insbesondere auch durch die eingeleiteten, geklärten Abwässer im Fälensee. Die Einleitung der nährstoffreichen Abwässer in ein stehendes Gewässer ist nicht eine optimale Lösung (bei Mittellandseen werden Ringleitungen erstellt, um dies zu vermeiden), das führt besonders im Herbst zu einer ästhetischen Beeinträchtigung. Bezüglich Sauerstoffgehalt können heute die vorgeschriebenen Qualitätsziele für stehende Gewässer nicht erreicht werden (vgl. Kap. 7.5). Eine Aus-

bringung auf die Alpweiden, die aber eine Berücksichtigung des hygienischen Aspekts verlangt, oder eine Versickerung der geklärten Abwässer wären zu prüfen. Die Schwinde Giesen direkt neben der Strasse dürfte auch zur Mühlebachquelle entwässern. In diesem Bereich sind Schutzmassnahmen nötig. Ob der Höhenzug Stauberer-Hochhus noch zum Einzugsgebiet der Quelle gehört, ist unsicher, aber auf Grund der Ergebnisse der Markierversuche (Ebenalp, Säntis) muss auch hier mit einem raschen Abfluss von Schadstoffen zu einer Quelle gerechnet werden.

12.5.5 Quellen in Alt St. Johann

Die Quellen liegen am Hangfuss im Siedlungsgebiet des Dorfes. Die zahlreichen Fassungen und Ableitungen erschweren den Ueberblick des Quellgebietes. Die Austritte liegen im Uebergangsbereich Seewerkalk-Gault-Schrattenkalk des Gulmengewölbes, das hier parallel zur Talrichtung verläuft. Die Hauptwasserzufuhr dürfte mutmasslich im Schratteknalk liegen, bei den Quellaustritten werden die allenfalls vorhandenen hangenden Schichten von Gault und Seewerkalk durchbrochen. Die tiefer liegenden Quellen beim Schäfli, der Dorfbach und der für die Trinkwasserversorgung gefasste Austritt schütten das ganze Jahr beträchtliche Wassermengen (Minimum rund 120 l/s). Höher liegende Austritte haben Ueberlaufcharakter und versiegen im Herbst.

Die Bedeutung der Quellgruppe ist bei einer ersten Betrachtung nicht zu erfassen. Die Abflussmessungen und die Markierversuche sprechen aber für ein Einzugsgebiet von 27 km². Das Einzugsgebiet erstreckt sich den geologischen Strukturen folgend weit nach Nordwesten. Es ist aber nicht zusammenhängend, sondern wird bei Unterwasser von der Säntisthur durchbrochen. Durch die Versickerung von Wasser der Säntisthur fliesst Wasser ins Einzugsgebiet der Quellen, andererseits führen die nachgewiesenen Austritte im Chämmerlitobel auch zu einem Abfluss aus dem nordöstlichen Teil des Einzugsgebietes Richtung Unterwasser. Im Chämmerlitobel ist offensichtlich eine Kreuzung von oberirdischen und unterirdischen Wasserflüssen mit gegenseitigem Wasseraustausch vorhanden. Der Rhodamindurchgang in Alt St. Johann zeigte, dass auch bei Hochwasser ein Teil der Säntisthur versickert. Die Wasseraustritte im Chämmerlitobel fallen hingegen bei Niederwasser weg. Die gesamte Wassermenge aus dem nordöstlichen Teil des Einzugsgebietes

fließt im tiefer gelegenen Karstwassersystem den Quellen in Alt St. Johann zu. Dies führt bei den tiefer gelegenen Quellen zu einer zuverlässigen Wasserführung in einem trockenen Spätherbst. Wegen der gegenseitigen Verknüpfung sind die Quellen in Alt St. Johann und jene im Gebiet Thurwies Lauiboden-Thurwies in einem Strukturmodell zusammengefasst.

Im Einzugsgebiet liegen im Gegensatz zu allen anderen Quellen dauernd besiedelte Gebiete, die sicher eine erhöhte Gefährdung für die Quellen bedeuten, insbesondere in unmittelbarer Umgebung der Quellen, aber auch im Gebiet Chüeboden. Eine direkte Gefährdung geht aber auch von den Schwinden Risi und bei den Dreihütten aus, die beide auch in Trockenzeiten zuverlässig Wasser führen. Durch die Versickerungen im Chämmerlitobel ist eine Gefährdung aus dem Einzugsgebiet Lauiboden nicht auszuschliessen. Der bedeutendste Gefahrenherd ist hier der Säntisgipfel. Die Chlorierung der Abwässer sollte die hygienischen Probleme eigentlich beseitigen. Aber der allfällige Umgang mit Chemikalien verlangt Vorsicht.

12.5.6 Quellen in der Thurwies und im Lauiboden

Das Quellgebiet der Thur besteht aus einer Vielzahl von Austritten, die im Zusammenhang mit der hier durchziehenden Rotstein-Gräppelen-Zone gesehen werden müssen. Sie werden hier zusammenfassend behandelt, weil sich auf Grund der vorliegenden Kenntnisse keine Aufgliederung von Einzugsgebieten möglich ist. Es scheint auch, dass sie z.T. eng miteinander verhängt sind und eine klare Gliederung gar nicht vorliegt. Genutzt werden nur zwei kleinere Quellaustritte, die für die Wasserfassung der Korporation Chüeboden sind.

Es können vier bedeutende Quellgruppen ausgeschieden werden:

- Quellen bei Gerstein (unterhalb Schafboden)
- Quellen in der Thurwies (NW-Seite)
- Quellen am Burstel
- Quellen im Lauiboden (NW-Seite)

Die Quellen bei Gerstein dürften v.a. aus dem Gebiet Schafboden (ev. auch Teile des Wildhauser Schafbergs) gespeisen werden. Diese Quellen weisen insbesondere zur Zeit

der Schneeschmelze eine etwas grössere Härte auf, als die benachbarten Quellen in der Wand und am Hangfuss der Thurwies. Bei diesen Quellen ist eine hydrologische Verbindung zum Gruebenseeli nachgewiesen (KEMPF 1968). Das Einzugsgebiet erstreckt sich wohl auch zu den Karrenfeldern der Tierwies hin, was während der Schneeschmelze zum direkten Abfluss von gering mineralisiertem Wasser führt. Dieses Karstwassersystem ist jenem überlagert, das die hydrologische Verbindung vom Gebiet des Säntisgipfels zu den Quellen am Burstel und im Lauiboden bildet. Vom Gruebenseeli ist auch Markierstoff ins unterliegende Karstwassersystem abgeflossen und in den Quellen am Burstel ausgetreten.

Die Quellen im Lauiboden werden ebenfalls von diesem tiefer liegenden Karstwassersystem gespiesen. Ein eher überraschendes Ergebnis ist die Oeffnung des Einzugsgebietes gegen Südwesten mit dem Abfluss geringer Tracermengen Richtung Starckenbach und Betlis (Walensee).

Die gefasste Quelle der Korporation Chüeboden am Waldrand unter der Strasse im Alpli-Hals hat sehr wahrscheinlich ein lokales Einzugsgebiet im Gebiet östlich des Austritts.

Auf die Gefahrenherde ist bereits im vorangehenden Kapitel im Zusammenhang mit den Quellen in Alt St. Johann eingegangen worden, da auf Grund der besonderen hydrologischen Verhältnisse diese beiden Einzugsgebiete miteinander verhängt sind.

13. SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK

Die dreijährigen Untersuchungen haben wichtige hydrologische Grundlagen in einem bisher wenig untersuchten Gebiet geliefert. Die vorliegende Arbeit leistet somit einen regional-hydrologischen Beitrag und die Resultate bilden eine wertvolle Grundlage für geeignete Grundwasserschutzmassnahmen.

Die eingesetzten Methoden haben sich grundsätzlich bewährt, obwohl nicht alle Untersuchungsbereiche das gleiche günstige Aufwand-/Ertragsverhältnis aufweisen. Die Auswertung der Wasserbeschaffenheit lieferte vergleichsweise wenige greifbare Ergebnisse, was aber nicht vorauszusehen war. Jedenfalls darf auch bei künftigen Untersuchungen nicht auf diesen Aspekt verzichtet werden. Die Markierversuche und die Resultate der Abflussmessungen ergänzen sich in idealer Weise. Die kurzfristig arbeitsintensiven Markierversuche bringen in Karstgebieten unentbehrliche punktuelle Ergebnisse, die durch die Abflussmessungen auf die Fläche erweitert werden können.

Ein schwieriger Fragenkomplex ist die Untersuchung der lokalen Infiltration von Karstwasser ins Porengrundwasser der quartären Talfüllungen. Die Lösung kann offensichtlich nicht im gleichen Zuge mit regionalen Markierversuchen angegangen werden. Dieser Massstab erfordert einen anderen, differenzierteren Untersuchungsansatz, der wegen fehlenden geeigneten Aufschlüssen relativ aufwendig ist. Dieser Problemkreis müsste im lokalen Rahmen beispielhaft angegangen werden, da dazu kaum allgemeine Erkenntnisse vorliegen. Die Resultate im Alpstein zeigten aber, dass in quantitativer Hinsicht dieser Infiltration für den Gebirgsstock des Alpsteins eine sehr untergeordnete Bedeutung zukommt.

In Bezug auf die wissenschaftliche Zielsetzung kann somit gesagt werden, dass das gewählte Methodenbündel der Tracerverfahren sich bewährt hat und auch in anderen Gebieten anwendbar sein sollte. Die Methodik der kombinierten Tracerverfahren erwies sich als geeignet zur Aufarbeitung der regionalen Hydrologie. Eine Uebertragung der Methodik auf andere Gebiete verlangt zwar eine Anpassung auf die regionalen Verhältnisse unter Berücksichtigung von Geologie, Hydrographie und den konkret anstehenden Problemen. Dies erfordert allenfalls eine andere Auswahl und/oder Gewichtung der einzelnen Tracermethoden und eine laufende Ueberprüfung in der Untersuchungsphase. Am Anfang muss aber

eine detaillierte Vorerkundung stehen, die zu Hypothesen führt. Nur so ist eine optimale Konzepterarbeitung und der Aufbau eines geeigneten Messnetzes möglich. Unter diesen Voraussetzungen liefern die kombinierten Tracerverfahren einen räumlichen Ueberblick und Detailkenntnisse, die in der Folge eine Gewässerschutzplanung auf gesicherter Grundlage erlauben.

Aus wissenschaftlicher Sicht wäre es zu begrüßen, wenn die nun vorhandenen Kenntnisse und Daten weiter ausgewertet werden könnten. Die Auswertung der Abflussdaten und die Aufarbeitung klimatologischer Daten im Hinblick auf Niederschlag-Abfluss-Modelle ausgewählter Quellen wäre eine konsequente Fortführung des angewendeten Konvergenzansatzes und würde eine Erweiterung der Rezessionsuntersuchungen bedeuten, die die wechselnden Inputverhältnisse nicht berücksichtigen. Die Ergebnisse wären wegen den unterschiedlichen untersuchten Quelltypen interessant. Dies würde eine bessere Einordnung der Resultate erlauben als bei bisherigen derartigen Untersuchungen, wo oft nur eine Quelle untersucht wurde. Aus tracerhydrologischer Sicht wäre eine systematische Untersuchung der Abhängigkeit der Fliessgeschwindigkeit (und anderer Parameter) von den hydrologischen Randbedingungen interessant. Dies würde eine Abschätzung der Variabilität erlauben und damit ein verbesserte Anwendbarkeit von Tracermethoden in Karstgebieten im Zusammenhang mit Verschmutzungsproblemen erlauben.

LITERATUR

- ARBENZ P. 1923: Geologisch-hydrologische Studien über die Abflussverhältnisse des Sämtisersees und des Fählensees. Bern.
- ASCHWANDEN H., WEINGARTNER R. 1985: Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde No. 65, Uni Bern.
- ASCHWANDEN H. 1985: Zur Abschätzung der Abflüsse in ungemessenen schweiz. Einzugsgebieten. Dissertation, Publ. Gewässerkunde No. 66, Uni Bern.
- BAECHLER E. 1932: Einiges von Fählensee und Sämtisersee. Clubnachrichten der Sektion St. Gallen des SAC, 4. Jg. Nr. 10-12.
- BAECHLER H. 1945: Untersuchungen über die Entstehung einiger Höhlen im Säntisgebirge. Bericht über die Tätigkeit der St. Gall. Natw. Ges., Bd. 71, S. 68-142.
- BACHMANN M. 1986: Bericht Forschungspraktikum Hydrologie. Semesterarbeit Uni Bern, nicht publ., Bern.
- BAKALOWICZ M. 1976: Géochimie des eaux karstiques. Une méthode d'étude de l'organisation des écoulements souterrains. In: Deuxième colloque d'hydrologie en pays calcaires, Besançon, Neuchâtel.
- BAKALOWICZ M.; MANGIN A. 1980: L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. In: Mémoire hors série, Société géologiques de France No 11, S. 71-79, Paris.
- BATSCHKE H. et al. 1970: Kombinierte Karstwasseruntersuchungen im Gebiet der Donauversickerung in den Jahren 1967-69. Steir. Beitr. zur Hydrogeologie, Graz.
- BECHMANN A. 1981: Grundlagen der Planungstheorie und Planungsmethodik. UTB 1088, Bern.
- BEHRENS H. 1982: Verfahren zum qualitativen und quantitativen Nachweis von nebeneinander vorliegenden Fluoreszenztracern. In: Tracermethoden in der Hydrologie, Beiträge zur Geologie der Schweiz-Hydrologie, Nr. 28 I, S.39-50, Bern.

- BEHRENS H., TEICHMANN G. 1982: Neue Ergebnisse über den Lichteinfluss auf Fluoreszenztracer. In: Tracermethoden in der Hydrologie, Beiträge zur Geologie der Schweiz-Hydrologie, Nr. 28 I, S. 69-78, Bern.
- BINGGELI V. 1974: Hydrologische Studien im zentralen schweizerischen Alpenvorland, insbesondere im Gebiet der Langete. Beitr. zur Geol. der Schweiz-Hydrologie, Nr. 22, Bern.
- BLAU R.V., MUCHENBERGER F., TRÜEB E., WERNER A., WUERSTEN M. 1984: Quantitative Erkundung von Lockergesteins-Grundwasserleitern am Beispiel Emmental. Handbuch. In: Gas, Wasser, Abwasser Nr. 5, S.249-388.
- BLUMER E. 1905: Geol. Monographie vom Ostende der Säntisgruppe. Diss. Uni Zürich, Bern.
- BOEGLI A. 1964: Mischungskorrosion. Ein Beitrag zum Verkarstungsproblem. In: Erdkunde 18/2, S. 83-92.
- BOEGLI A. 1978: Karsthydrographie und Physische Speläologie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- BOEGLI A. 1981: Hydrogeologische Untersuchungen im Karst des hinteren Muotatales. In: Steir. Beitr. zur Hydrogeologie, Graz.
- BOESCH F. 1940: Färbversuche im Seealpsee. Bericht an die Feuerschaukommission Appenzell, Zürich.
- BRAUN L.N. 1985: Simulation of Snowmelt-Runoff in Lowland and Lower Alpine Regions of Switzerland. Zürcher Geographische Schriften, H. 21, Zürich.
- BUNDESAMT FUER UMWELTSCHUTZ 1982a: Handbuch für die Abflussmengenmessung. Landeshydrologie, Mitt. Nr.4, Bern.
- BUNDESAMT FUER UMWELTSCHUTZ 1982b: Wegleitung zur Ausscheidung von Gewässerschutzbereichen, Grundwasserschutzzonen und Grundwasserschutzzonen. Teilrevidierte Auflage, Bern.
- BUNDESAMT FUER WASSERWIRTSCHAFT 1984: Kleinwasserkraftwerke in der Schweiz. Teil 11a Oberes Toggenburg, Bern.

- BURGER A. 1983: Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura. In: Gas, Wasser, Abwasser, Nr. 9, S. 533-583.
- BRAUN L. N. 1985: Simulation of Snowmelt-Runoff in Lowland and Lower Alpine Regions of Switzerland. Zürcher Geographische Schriften, Bd. 21, Zürich.
- CHAUVE P. et al. 1982a: Les éléments chimiques extérieurs au système karstique indicateurs de la qualité des eaux des réserves des calcaires jurassiens. In: Troisième colloque d'hydrogéologie en pays calcaire, S. 23-38, Besançon, Neuchâtel.
- CHAUVE P. et al. 1982b: Evolution physico-chimique des eaux souterraines contaminées à travers un milieu calcaire fissuré dans la région de Baume-les Dames. In: Troisième colloque d'hydrologie en pays calcaire, S. 103-114, Besançon, Neuchâtel.
- DERVEY T. 1985: Beitrag zum Sorptionsverhalten von Fluoreszenztracern. Diplomarbeit Uni Bern.
- DYCK S. 1980: Angewandte Hydrologie. Teil 1 und 2, 2. Auflage, Berlin, München.
- EUGSTER H.; HANTKE R.; SAXER F. 1967: Exkursion Nr. 30-Appenzellerland und Säntisgebirge. Geol. Führer der Schweiz 6, S. 516-534.
- EUGSTER H.; FROEHLICHER H.; KEMPF Th. 1969: Bericht über die Exkursion der Schweiz. Geol. Ges. ins Säntisgebiet. Ecl. Geol. Helv. 62/2.
- FISCHER M. 1986: Einem Bergsee auf den Grund gefühlt. In: Höhlenkurier, Zeitschrift des Höhlenklubs Alpstein, Heft 4/1, fotokopiert, Appenzell.
- FORRER M. 1948: Zur Geologie der östlichen Wildhauser Mulde. Jb. St. Gall. Natw. Ges., Bd. 73, St. Gallen.
- FROEHLICHER H. 1960: Zur Stratigraphie und Tektonik der Unterkreide im Gebiet der Hohenkastenfalte. Ec. Geol. Helv., 53/2, S. 505-515.
- FUNK H. 1971: Zur Stratigraphie und Lithologie des Helv. Kieselkalkes und der Altmansschichten im Säntis. Zürich.

- GHO (Gruppe für operationelle Hydrologie) 1985: Die Schneedecke in der Schweiz aus hydrologischer Perspektive. Mitt. Nr. 1, Bern.
- GOSPODARIC R.; ZOETL J. 1976: Markierung unterirdischer Wasser (Untersuchungen in Slowenien 1972-75). In; Steir. Beitr. zur Hydrogeologie, Graz.
- GSTEIGER R., WELTI Ph. 1987: Morphometrische, Hydrographische und Geomorphologische Aufnahme des Seealpsees, Hausarbeit Geogr. Inst. Uni Bern.
- HAGEN T. 1952: Das westliche Säntisgebirge photogeologisch gesehen. Jb. St. Gall. Natw. Ges., St.Gallen.
- HANTKE R. 1970: Zur Datierung spätwürmeiszeitlicher Gletschertände am Rande des Säntisgebirges. In: Ecl. Geol. Helv., 63/2, S. 501-511.
- HANTKE R. 1980: Eiszeitalter. Bd. 2, Ott Verlag, Thun.
- HANTKE R.; KOBEL M.: Grundwasserzirkulation und Quellen, in: Erl. zum geol. Atlas, Blatt Nr. 78: Säntis (noch unveröffentlicht).
- HEIERLI H. 1974: Geologie von Wildkirchli und Ebenalp. Appenzell.
- HEIERLI H. 1984: Die Ostschweizer Alpen und ihr Vorland. Säntismassiv, Churfirsten, Mattstock, Alviergruppe, Appenzeller Molasse. Sammlung Geol. Führer, Bd. 75, Gebr. Bornträger, Berlin, Stuttgart.
- HEIM Albert 1905: Das Säntisgebirge. Beiträge zur geol. Karte der Schweiz, Neue Folge, 16. Lieferung, Bern.
- HEIM Albert 1921: Geologie der Schweiz, Leipzig.
- HEIM Arnold 1923: Der Alpenrand zwischen Appenzell und Rheintal und das Problem der Kreide-Nummuliten. Beitr. zur Geol. Karte der Schweiz, Neue Folge, 53. Lieferung, Bern.
- HEMPEL L. 1974: Einführung in die Physiogeographie. Einleitung und Geomorphologie. Wiesbaden.
- HOETZL H. 1982: Statistische Methoden zur Auswertung hydrochemischer Daten. In: DVWK Schriften 54: Auswertung hydrochemischer Daten, Hamburg, Berlin.

- JAMIER D. 1976: Interpretation des essais de traçage des eaux karstiques. In: Annales scientifiques de l'Université de Besançon, Fasc. 25, 3ème série, Besançon.
- KAESS W. 1982: Routinemässige Bestimmung von zwei Fluoreszenzfarbstoffen nebeneinander. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, Bd. 28I, Bern.
- KEMPF Th. 1966: Geologie des westlichen Säntisgebirges, Diss. Uni Zürich, Bern.
- KEMPF Th. 1968: Quellenuntersuchungen in der Thurwies 1966, 1968. Unveröffentlichte Feldbücher, Karte.
- KIRALY L. 1973: Notice explicative de la Carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel. Suppl. du bulletin de la société neuchâteloise des sciences naturelles. Neuchâtel.
- KLUG H., LANG R. 1983: Einführung in die Geosystemlehre. Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt.
- KOBEL M.; HANTKE R. 1979: Zur Hydrogeologie des Rheintales von Sargans bis zum Bodensee. J.Ber. Mitt. ober-rhein. geol. Ver., N.F. 61, S. 79-86, Stuttgart.
- KULLMANN E. 1982: Particularités du régime d'écoulement des eaux souterraines de karsts fortement développés. In: Troisième colloque d'hydrologie en pays calcaire, S. 143-146, Besançon, Neuchâtel.
- LEIBUNDGUT Ch.; WEINGARTNER R. (Hrsg.) 1982: Tracermethoden in der Hydrologie. Beitr. zur Geologie der Schweiz-Hydrologie, Bd. I,II, Bern.
- LEIBUNDGUT Ch. 1984: Zur Erfassung hydrologischer Messwerte und deren Uebertragung auf Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen. In: Geomethodica, Bd. 9, S. 141-170, Basel.
- LEIBUNDGUT Ch. 1985: Detailliertes Untersuchungsprogramm zum Projekt "Tracerhydrologie Alpstein", Bern.
- LEIBUNDGUT Ch. et al. 1985: Weiterbildungskurs in Tracerhydrologie, Kursunterlagen Uni Bern.

- LEIBUNDGUT Ch.; GOSPODARIC R. 1986: Evaluation and Interpretation of the Tracing Data, In: Steir. Beitr. zur Hydrogeologie S. 276-287, Jg.1985/86, Wien, New York.
- LEIBUNDGUT Ch. 1986a: Hydroökologische Untersuchungen in einem alpinen Einzugsgebiet (Testgebiet Grindelwald). Publ. Gewässerkunde No. 96, Uni Bern.
- LEIBUNDGUT Ch. 1986b: Zur Anwendung künstlicher Tracer in Gletschern. Publ. Gewässerkunde No. 85, Uni Bern.
- LIENERT O. 1965: Stratigraphie der Drusbergschichten und des Schrattenkalkes im Säntisgebirge unter besonderer Berücksichtigung der Orbitoliniden. Diss. ETHZ, Zürich.
- LIENERT O. 1973: Auswirkung einer Wasserentnahme im Schuttkegel und aus den Quellen im Tosbachgebiet, Schwägalp. Gutachten.
- LIENERT O. 1983: Pumpversuche im Talboden von Alt St. Johann beim Schützenstand und im Chessi zur Bestimmung des Grundwasserdargebotes und des Anteils von Thurinfiltrat, Gutachten.
- LEND A., ZUBER A. 1970: Tracer Dispersion in Groundwater Experiments. In: Isotope Hydrology, Proceedings of a Symposium on Use of Isotopes in Hydrology, S. 619-641. IAEA, Wien.
- LOUIS H. 1968: Lehrbuch der allg. Geographie, Bd. Allg. Geomorphologie, 3. Auflage, Berlin.
- LUDER B. 1986: Ein Messgerät zur Bestimmung des Abflusses nach dem Verdünnungsverfahren. Hausarbeit Uni Bern.
- LUETHI H. 1938: Geomorphologische Untersuchungen im Säntisgebirge. Jb. St. Gall. Natw. Ges., Bd. 69, S. 129-190.
- MALOSZEWSKI P. 1985: Development and Application of Mathematical Flow Models for Interpreting Tracer Experiments in Porous Groundwater Systems. In: Weiterbildungskurs in Tracerhydrologie, Kursunterlagen Uni Bern.

- MANGIN A. 1982: Mise en évidence de l'originalité et de la diversité des aquifères karstiques. In: Troisième colloque d'hydrologie en pays calcaire, S. 159-171, Besançon, Neuchâtel.
- MATTHESS G. 1973: Die Beschaffenheit des Grundwassers Lehrbuch der Hydrogeologie Bd.2, Bornträger Berlin, Stuttgart.
- MATTHESS G.; UBELL K. 1983: Allg. Hydrologie, Grundwasserhaushalt. Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 1, Berlin, Stuttgart.
- MISEREZ J. 1973: Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse Uni Neuchâtel.
- MOESCHLER P.; MUELLER I.; SCHOTTERER U. 1982: Les organismes vivants, indicateurs naturels dans l'hydrodynamique du karst, confrontés aux données isotopiques, chimiques et bactériologiques, lors d'une crue de la source de l'Areuse. In: Beitr. zur Geol. der Schweiz-Hydrologie, Bd. 28, Bern.
- MORFIS A., ZOJER H. (Hrsg.) 1986: Karst Hydrogeology of the Central and Eastern Peloponnesus (Greece).. Steir. Beitr. zur Hydrogeologie, Graz.
- MUELLER I. et al. 1980: Karsthydrologische Untersuchungen im Neuenburger Jura, In: Steir. Beitr. zur Hydrogeologie, Graz.
- MUELLER I.; BURGER A.; SCHOTTERER U.; SIEGENTHALER U. 1983: Résultat des méthodes d'investigations indirectes dans l'exploration des aquifères calcaires. In: Gas, Wasser, Abwasser, Nr. 9, S. 501-515.
- NAENNY P. 1973: Das Grundwasser im Talboden von Wasser-auen. Gutachten.
- PETRASCHEK A.; TRIPET J.P. 1982: Estimation du renouvellement des réserves en eau du karst par modèle mathématique précipitations/écoulements pour le bassin de Laufon. In: Troisième colloque d'hydrologie en pays calcaire, Besançon, Neuchâtel.
- PFEFFER K.H. (Hrsg.) 1986: International Atlas of Karst Phenomena. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 59, Gebr. Bornträger, Berlin, Stuttgart.

- REUTIMANN Th. 1987: Hydrologie der Alpsteinseen. Publ. Gewässerkunde No. 90 , Diplomarbeit Uni Bern.
- RUTISHAUSER W.F. 1919: Beiträge zur Geologie des Säntisgebirges im Gebiete vom Gräppelental zum Rotsteinpass. In: Jb. St. Gall. Natw.Ges., 56, St. Gallen.
- SANSONI M., SCHUDEL B., WAGNER T. 1987: Tracermethodischer Beitrag zum Stofftransport im Porengrundwasser. Diplomarbeit Uni Bern, Publ. Gewässerkunde Nr. 94, Bern.
- SAXER F. 1966: Erläuterungen zur Grundwasserkarte des Kantons St. Gallen.
- SCHLATTER L.E. 1942: Neue geologische Untersuchungen im mittleren Säntisgebirge. Jb. der St. Gall. Natw. Ges., Bd. 70, S. 27-137.
- SCHWEIZ. ALPKATASTER 1969: Die Land- und Alpwirtschaft im Kanton Appenzell-Innerrhoden. Abt. Landwirtschaft EVED, Bern.
- SCHWEIZ. METEOROLOGISCHE ANSTALT 1979: Regionale Klimabeschreibungen der Schweiz. Bd. 2, Zürich.
- SCHWEIZ. METEOROLOGISCHE ANSTALT 1980: Schneedecke und Neuschnee. Klimatologie der Schweiz, Heft 24/F, Zürich.
- SIMMLEIT N.; HEMPFLING R. 1986: Stickstoff-Mineralisation und Nitratauswaschung im Karstgebiet der nördlichen Frankenalb. In: Wasser+Boden, Nr. 12, S. 609-612.
- SIRAGUSA F. 1988: Auswertung von Abflussdaten des Alpsteingebietes, Hausarbeit Uni Bern.
- SMART C.C. 1983: The Hydrology of a Glacierised Alpine Karst. Castleguard Mountain Alberta. Dissertation Mc Maser University.
- STICHLER W.; ZOJER H. 1986: Umweltisotopen und hydrochemische Untersuchungen als Hilfsmittel für die Erfassung von Quelleinzugsgebieten. In: Oesterreichische Wasserwirtschaft, Heft Nr. 11/12.

- STRASSER A. 1979: Betlis-Kalk und Diphodeskalk (Valangianian) in der Zentral- und Ostschweiz: Stratigraphie, Mikrofazies und sedimentologische Entwicklung. Mitt. geol. Inst. ETH und Uni Zürich, N.F. 225.
- TAPPOLET W. 1922: Beiträge zur Kenntnis der Vergletscherung des Säntisgebirges. Jb. St. Gall. Natw. Ges., Bd. 58/2, S. 1-66.
- TRIPET J.P. 1973: Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse. Matériaux pour la Géologie de la Suisse-Hydrologie, No. 21, Zürich.
- UEBERLA K. 1977: Faktorenanalyse. Eine systematische Einführung für Psychologen, Mediziner, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- UNESCO 1984: Guide to the Hydrology of the Carbonate Rocks. Studies and Reports in Hydrology, Nr. 41.
- WALSER E. 1976: Die appenzellischen Gewässer. Appenzeller Hefte Nr. 11, Appenzell.
- WALSER E. 1982: Der natürliche Wasserhaushalt in unvergletscherten Flusseinzugsgebieten. Grundsätzliches, Fehlerbetrachtungen, Anwendungen am Beispiel des Thurgebietes, Bern.
- WEBER G. et al. 1978: Der Grundwasserstrom des Alpenrheins. In: Wasser, Energie, Luft, 1978, Heft 5, S. 95-172.
- WERNLI H. 1986: Naphthionat - Ein neuer Fluoreszenztracer zur Wassermarkierung. In: Deutsche gewässerkundl. Mitteilungen, 30. Jg. Heft 1, S. 16-19.
- WEXSTEEN P. 1986: Relations entre le chimisme et l'hydrogramme de la source de l'Areuse. In: Bulletin du Centre d'Hydrogéologie, No 6, Neuchâtel.
- WILDBERGER A. 1981: Zur Hydrogeologie des Karstes im Rawil-Gebiet. Beitr. zur Geologie der Schweiz-Hydrologie, Bd. 27, Bern.

ZELLER J.; GEIGER H.; ROETHLISBERGER G. 1977: Starknieder-
schläge des schweiz. Alpen- und Alpenrandgebietes;
Intensitäten und Häufigkeiten; ausgewertete Periode
1901-70. Bd. 2: Fürstentum Liechtenstein, SG, AI,
AR, ZH(südwestl. Teil). Eidg. Anstalt für das forst-
liche Versuchswesen, Birmensdorf.

ZOETL J. 1974: Karsthydrogeologie. Springer Verlag, Wien.

GEOGRAPHICA BERNENSIA



Arbeitsgemeinschaft GEOGRAPHICA BERNENSIA
Hallerstrasse 12
CH-3012 Bern

GEOGRAPHISCHES INSTITUT
der Universität Bern

A	AFRICAN STUDIES	Sfr.
A 1	WINIGER Matthias (Editor): Mount Kenya Area - Contributions to Ecology and Socio-economy. 1986 ISBN 3-906290-14-X	20.--
A 2	SPECK Heinrich: Mount Kenya Area. Ecological and Agricultural Significance of the Soils - with 2 maps. 1983 ISBN 3-906290-01-8	15.--
A 3	LEIBUNDGUT Christian: Hydrogeographical map of Mount Kenya Area. 1 : 50'000. Map and explanatory text. 1986 ISBN 3-906290-22-0	20.--
A 4	WEIGEL Gerolf: The soils of the Maybar/Wello area. Their potential and constraints for agricultural development. A case study in the Ethiopian Highlands. 1986 ISBN 3-906290-29-8	18.--
A 5	KOHLER Thomas: Land use in transition. The case of Laikipia District, Kenya. Aspects and problems of smallscale farming in a new environment. 1987 ISBN 3-906290-23-9	1988
A 6	FLURY Manuel: Rain-fed agriculture in Central Division (Laikipia District, Kenya). Suitability, constraints and potential for providing food. 1987 ISBN 3-906290-38-7	1988
<hr/>		
B	BERICHTE UEBER EXKURSIONEN, STUDIENLAGER UND SEMINARVERANSTALTUNGEN	
B 1	AMREIN Rudolf: Niederlande - Naturräumliche Gliederung, Landwirtschaft Raumplanungskonzept. Amsterdam, Neulandgewinnung, Energie. Feldstudienlager 1976. 1979	5.--
B 6	GROSJEAN Georges (Herausgeber): Bad Ragaz 1983. Bericht über das Feldstudienlager des Geographischen Instituts der Universität Bern. 1984 ISBN 3-906290-18-2	10.--
B 7	Peloponnes. Feldstudienlager 1985. Leitung/Redaktion: Attinger R., Leibundgut Ch., Nägeli R. 1986 ISBN 3-906290-30-1	21.--
B 8	AERNI K., NAEGELI R., THORMANN G. (Hrsg.): Das Ruhrgebiet. Ein starkes Stück Deutschland. Probleme des Strukturwandels in einem "alten" Industrieraum. Bericht des Feldstudienlagers 1986. 1987 ISBN 3-906290-36-0	20.--
<hr/>		
G	GRUNDLAGENFORSCHUNG	
G 1	WINIGER Matthias: Bewölkungsuntersuchung über der Sahara mit Wettersatellitenbilder. 1975	10.--
G 3	JEANNERET François: Klima der Schweiz: Bibliographie 1921 - 1973; mit einem Ergänzungsbericht von H. W. Courvoisier. 1975	10.--
G 6	JEANNERET F., VAUTHIER Ph.: Kartierung der Klimaeignung für die Landwirtschaft der Schweiz. / Levé cartographique des aptitudes pour l'agriculture en Suisse. 1977	20.-- Textband Kartenband 36.--

			Sfr.
G 7	WANNER Heinz: Zur Bildung, Verteilung und Vorhersage winterlicher Nebel im Querschnitt Jura - Alpen. 1978		10.--
G 8	Simen Mountains-Ethiopia, Vol. 1: Cartography and its application for geographical and ecological Problems. Ed. by Messerli B. and Aerni K. 1978		10.--
G 9	MESSERLI B., BAUMGARTNER R. (Hrsg.): Kamerun. Grundlagen zu Natur und Kulturraum. Probleme der Entwicklungszusammenarbeit. 1978		red. Preis 43.-- 15.--
G 11	HASLER Martin: Der Einfluss des Atlasgebirges auf das Klima Nordwestafrikas. 1980. ISBN 3-26004857 X		15.--
G 12	MATHYS H. et al.: Klima und Lufthygiene im Raume Bern. 1980		10.--
G 13	HURNI H., STAEHLI P.: Hochgebirge von Semien-Aethiopien Vol. II. Klima und Dynamik der Höhenstufung von der letzten Kaltzeit bis zur Gegenwart. 1982		10.--
G 14	FILLIGER Paul: Die Ausbreitung von Luftschadstoffen - Modelle und ihre Anwendung in der Region Biel. 1986 ISBN 3-906290-25-5		20.--
G 15	VOLZ Richard: Das Geländeklima und seine Bedeutung für den landwirtschaftlichen Anbau. 1984 ISBN 3-906290-10-7		27.--
G 16	AERNI K., HERZIG H. E. (Hrsg.): Bibliographie IVS 1982. Inventar historischer Verkehrswege der Schweiz. (IVS). 1983		250.--
G 16	id. Einzelne Kantone (1 Ordner + Karte)		je 15.--
G 17	IVS Methodik		in Vorbereitung
G 18	AERNI K., HERZIG H. E. (Hrsg.): Historische und aktuelle Verkehrsgeographie der Schweiz. 1986 ISBN 3-906290-27-1		28.--
G 19	KUNZ Stefan: Anwendungsorientierte Kartierung der Besonnung im regionalen Massstab. 1983 ISBN 3-906290-03-4		10.--
G 20	FLURY Manuel: Krisen und Konflikte - Grundlagen, ein Beitrag zur entwicklungspolitischen Diskussion. 1983 ISBN 3-906290-05-0		5.--
G 21	WITMER Urs: Eine Methode zur flächendeckenden Kartierung von Schneehöhen unter Berücksichtigung von reliefbedingten Einflüssen. 1984 ISBN 3-906290-11-5		20.--
G 22	BAUMGARTNER Roland: Die visuelle Landschaft - Kartierung der Ressource Landschaft in den Colorado Rocky Mountains (U.S.A.). 1984 ISBN 3-906290-20-4		28.--
G 23	GRUNDER Martin: Ein Beitrag zur Beurteilung von Naturgefahren im Hinblick auf die Erstellung von mittelmassstäbigen Gefahrenhinweiskarten (Mit Beispielen aus dem Berner Oberland und der Landschaft Davos). 1984 ISBN 3-906290-21-2		36.--
G 25	WITMER Urs: Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz. 1986 ISBN 3-906290-28-X		21.--
G 26	BICHSEL Ulrich: Periphery and Flux: Changing Chandigarh Villages. 1986 ISBN 3-906290-32-8		18.--
G 27	JORDI Ulrich: Glazialmorphologische und gletschergeschichtliche Untersuchungen im Taminatal und im Rheintalabschnitt zwischen Flims und Feldkirch (Ostschweiz/Vorarlberg). 1987 ISBN 3-906290-34-4		28.--
G 28	BERLINCOURT Pierre: Les émissions atmosphériques de l'agglomération de Bienne: une approche géographique. 1988 ISBN 3-906290-40-9		24.--
G 29	ATTINGER Robert: Tracerhydrologische Untersuchungen im Alpstein. Methodik des kombinierten Tracereinsatzes für die hydrologische Grundlagenerarbeitung in einem Karstgebiet. 1988 ISBN 3-906290-43-3		28.--

- G 30 WERNLI Hans Ruedi: Zur Anwendung von Tracermethoden in einem quartärbedeckten Molassegebiet. 1988 1988
- P GEOGRAPHIE FUER DIE PRAXIS
-
- P 2 UEHLINGER Heiner: Räumliche Aspekte der Schulplanung in ländlichen Siedlungsgebieten. Eine kulturgeographische Untersuchung in sechs Planungsregionen des Kantons Bern. 1975 10.--
- P 3 ZAMANI ASTHIANI Farrokh: Province East Azarbayejan - IRAN, Studie zu einem raumplanerischen Leitbild aus geographischer Sicht. Geographical Study for an Environment Development Proposal. 1979 10.--
- P 4 MAEDER Charles: Raumanalyse einer schweizerischen Grossregion. 1980 10.--
- P 5 Klima und Planung 79. 1980 10.--
- P 7 HESS Pierre: Les migrations pendulaires intra-urbaines à Berne. 1982 10.--
- P 8 THELIN Gilbert: Freizeitverhalten im Erholungsraum. Freizeit in und ausserhalb der Stadt Bern - unter besonderer Berücksichtigung freiräumlichen Freizeitverhaltens am Wochenende. 1983
ISBN 3-906290-02-6 10.--
- P 9 ZAUGG Kurt Daniel: Bogota-Kolumbien. Formale, funktionale und strukturelle Gliederung. Mit 50-seitigem Resumé in spanischer Sprache. 1984
ISBN 3-906290-04-2 10.--
- P 12 KNEUBUEHL Urs: Die Entwicklungssteuerung in einem Tourismusort. Untersuchung am Beispiel von Davos für den Zeitraum 1930 - 1980. 1987
ISBN 3-906290-08-5 25.--
- P 13 GROSJEAN Georges: Aesthetische Bewertung ländlicher Räume. Am Beispiel von Grindelwald im Vergleich mit anderen schweizerischen Räumen und in zeitlicher Veränderung. 1986 ISBN 3-906290-12-3 35.--
- P 14 KNEUBUEHL Urs: Die Umweltqualität der Tourismusorte im Urteil der Schweizer Bevölkerung. 1987 ISBN 3-906290-35-2 12.50
- P 15 RUPP Marco: Stadt Bern: Entwicklung und Planung in den 80er Jahren. Ein Beitrag zur Stadtgeographie und Stadtplanung. 1988
ISBN 3-906290-07-7 30.--
- P 16 MESSERLI B. et al.: Umweltprobleme und Entwicklungszusammenarbeit. Entwicklungspolitik in weltweiter und langfristig ökologischer Sicht. Red.: B. Messerli, T. Hofer. 1988 ISBN 3-906290-39-5 10.--
- P 17 BAETZING Werner: Die unbewältigte Gegenwart als Zerfall einer traditions-trächtigen Alpenregion. Sozio-kulturelle und ökonomische Probleme der Valle Stura di Demonte (Piemont) und Perspektiven für die Zukunftsorientierung. 1988 ISBN 3-906290-42-5 30.--
- S GEOGRAPHIE FUER DIE SCHULE
-
- S 4 AERNI Klaus et al.: Die Schweiz und die Welt im Wandel. Teil I: Arbeitshilfen und Lernplanung (Sek.-Stufe I + II). 1979 8.--
- S 5 AERNI Klaus et al.: Die Schweiz und die Welt im Wandel. Teil II: Lehrerdokumentation. 1979 28.--
S 4 und S 5: Bestellung richten an:
Staatl. Lehrmittelverlag, Güterstr. 13, 3008 Bern
- S 6 AERNI K. et al.: Geographische Praktika für die Mittelschule - Zielsetzung und Konzepte. in Vorbereitung

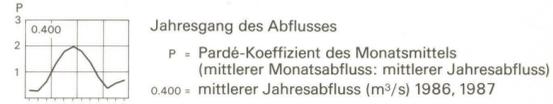
			sFr.
S	7	BINZEGGER R., GRUETTER E.: Die Schweiz aus dem All. Einführungspraktikum in das Satellitenbild. 1981 (2. Aufl. 1982)	10.--
S	8	AERNI K., STAUB B.: Landschaftsökologie im Geographieunterricht. Heft 1. 1982	9.--
S	9	GRUETTER E., LEHMANN G., ZUEST R., INDERMUEHLE O., ZURBRIGGEN B., ALTMANN H., STAUB B.: Landschaftsökologie im Geographieunterricht. Heft 2: Vier geographische Praktikumsaufgaben für Mittelschulen. (9. - 13. Schuljahr) - Vier landschaftsökologische Uebungen. 1982	12.--
S	10	STUCKI Adrian: Vulkan Dritte Welt. 150 Millionen Indonesier blicken in die Zukunft. Unterrichtseinheit für die Sekundarstufe II. 1984 ISBN 3-906290-15-8	
		Lehrerheft mit 2 Sätzen Gruppenarbeiten u. 1 Schülerheft	30.--
		Schülerheft	1.60
		Klassensatz Gruppenarbeiten	12.--
S	11	AERNI K., THORMANN G.: Lehererdokumentation Schülerkarte Kanton Bern. 1986 ISBN 3-906290-31-X	9.--
S	12	BUFF Eva: Das Berggebiet. Abwanderung, Tourismus - regionale Disparitäten. Unterrichtseinheit für die Sekundarstufe II. 1987 ISBN 3-906290-37-9	
		Lehrerheft	20.--
		Schülerheft	2.--
		Gruppenarbeiten	10.--
		65 Dias	70.--
		Tonband	7.--
S	13	POHL Bruno: Computereinsatz im Geographieunterricht. 1988 ISBN 3-906290-41-7	1988
U		<u>SKRIPTEN FUER DEN UNIVERSITAETSUNTERRICHT</u>	
U	1	GROSJEAN Georges: Die Schweiz. Der Naturraum in seiner Funktion für Kultur und Wirtschaft. 1985 (3. Auflage)	10.--
U	5	GROSJEAN Georges: Die Schweiz. Städte. 1985 (2. Auflage) ISBN 3-906290-17-5	16.--
U	8	GROSJEAN Georges: Geschichte der Kartographie. 1984 (2. Auflage) ISBN 3-906290-16-7	32.--
U	9	GROSJEAN Georges: Kartographie für Geographen I. 1984	vergriffen
U	10	GROSJEAN Georges: Kartographie für Geographen II. Thematische Kartographie. 1981 (Nachdruck)	14.--
U	11	FREI Erwin: Agrarpedologie. Eine kurzgefasste Bodenkunde. Ihre Anwendung in der Landschaft, Oekologie und Geographie. 1983 ISBN 3-906290-13-1	27.--
U	17	MESSERLI B., BISAZ A., LAUTERBURG A.: Entwicklungsstrategien im Wandel. Ausgewählte Probleme der Dritten Welt. Seminarbericht. 1985	10.--
U	18	LAUTERBURG Andreas (Hrsg.): Von Europa Lernen? - Beispiele von Entwick- lungsmustern im alten Europa und in der Dritten Welt. 1987 ISBN 3-906290-33-6	22.50

Hydrogeographische Karte des Alpsteins

1:50 000

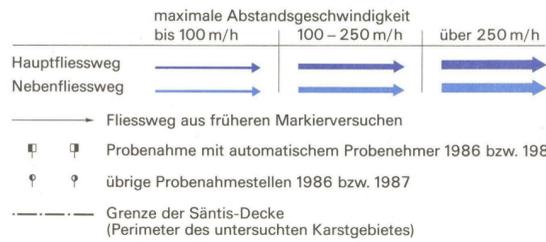
Hydrographie und Hydrometrie:

- Gewässernetz
- Quelle
- Quelle (mittlere Schüttung > 50 l/s)
- aktive Schwinde
- Abflussmessstation (Limnigraph)
- Lattenpegel



Markierversuche:

- Einspeisung 1986
- Einspeisung 1987
- Einspeisung bei früheren Markierversuchen



Gesamtauswertung, Beurteilung:

Einzugsgebiete:

- Schwendebach-EW (Gätteri-Wasserauen)
- Tschuder-Wasserauen
- Brülbach-Pfannenstiel
- Mühlebach-Sennwald
- Quellen in Alt St. Johann
- Quellgebiet der Thur (Thurwies, Lauiboden)
- Tosbach-Schwägälp
- Berndlibach
- Berggasthäuser (mit punktuell bedeutendem Abwasseranfall)
- Gebiet mit geringer Belastbarkeit und/oder hoher Gefährdung

Abflussmessstationen an Quellen und Oberflächengewässern:

- 1 Tschuder-Wasserauen (Quelle)
- 2 Gätteri-Wasserauen (Quelle)
- 3 Schwendebach-EW
- 4 Schwendebach-Ditzes
- 5 Brülbach-Pfannenstiel
- 6 Thur-Munzenriet
- 7 Thur-Hotel Säntis
- 8 Säntisthur-Lau
- 9 Säntisthur-Unterwasser
- 10 Thur-Klostobel
- 11 Thur-Bürgerheim
- 12 Thur-Stein (L+H)
- 13 Simm-Gams (L+H)
- 14 Dorfbach-Alt St. Johann (Quelle)
- 15 Mülibach-Alt St. Johann (Quelle)
- 16 Pumpwerk-Alt St. Johann (Quelle)

Latzenpegel an Quellen im oberen Toggenburg:

- 17 Schäflibach
- 18 Vorderer Bach
- 19 Gerinne bei Loser
- 20 Gerinne bei Brändle
- 21 Gerinne bei Bürgerheim
- 22 Bach bei Käserei Stofel
- 23 Schiessbach-Schützenhaus

Weitere Quellen:

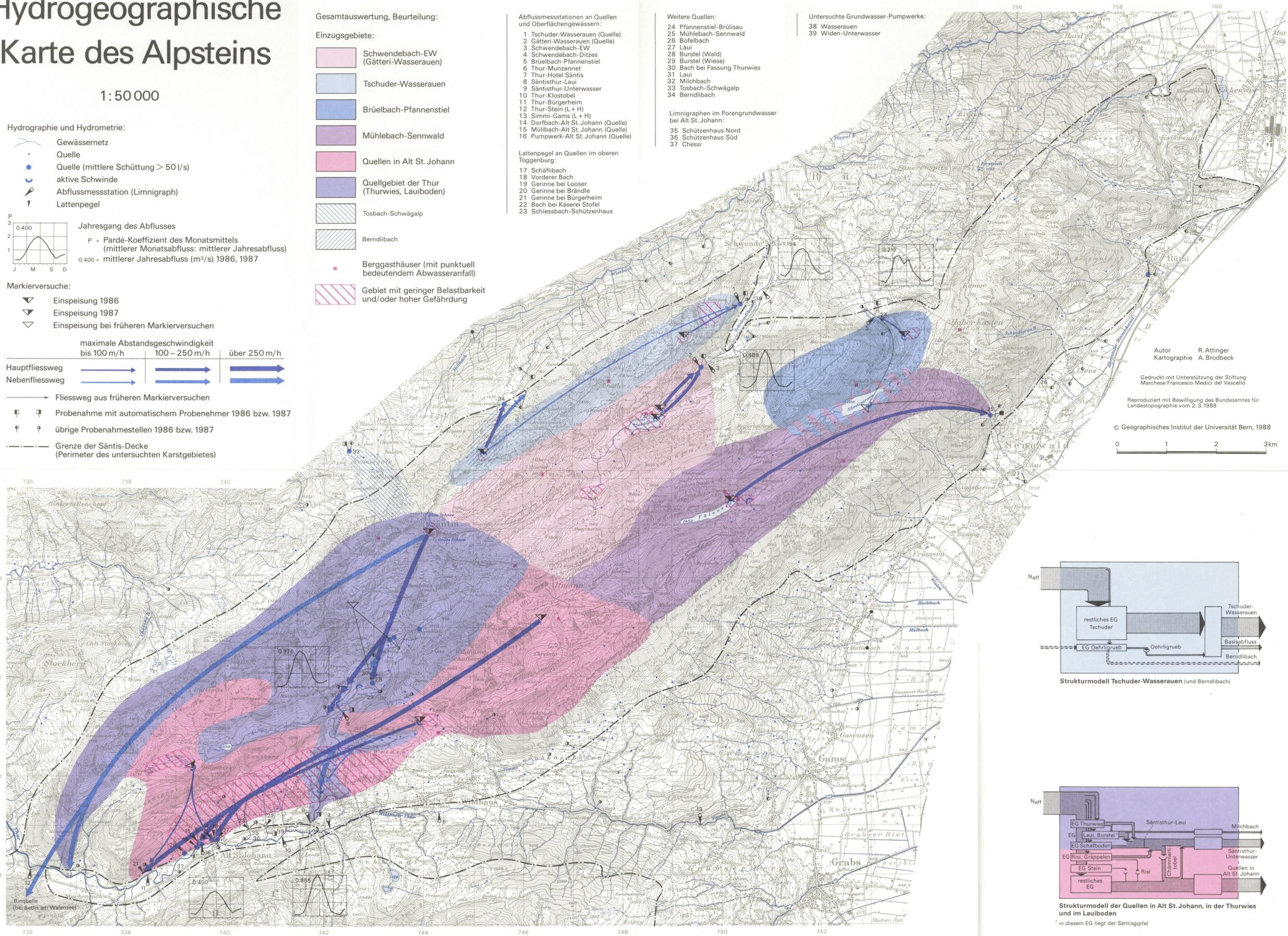
- 24 Pfannenstiel-Brülsau
- 25 Mühlebach-Sennwald
- 26 Bofelbach
- 27 Lau
- 28 Burstel (Wald)
- 29 Burstel (Wiese)
- 30 Bach bei Fassung Thurwies
- 31 Lau
- 32 Milchbach
- 33 Tosbach-Schwägälp
- 34 Berndlibach
- 35 Schützenhaus Nord
- 36 Schützenhaus Süd
- 37 Chessi

Limnigraphen im Porengrundwasser bei Alt St. Johann:

- 35 Schützenhaus Nord
- 36 Schützenhaus Süd
- 37 Chessi

Untersuchte Grundwasser-Pumpwerke:

- 38 Wasserauen
- 39 Widen-Unterwasser

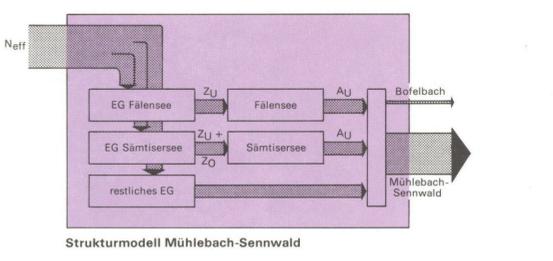
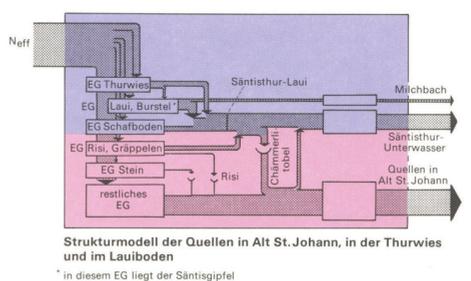
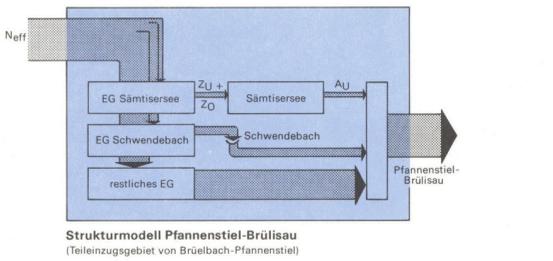
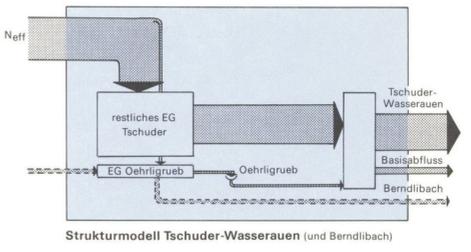
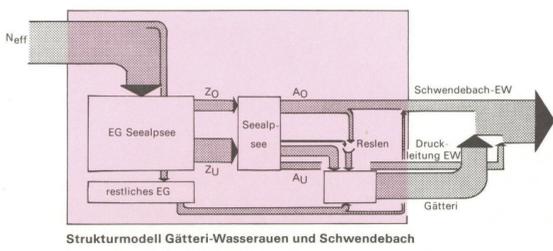
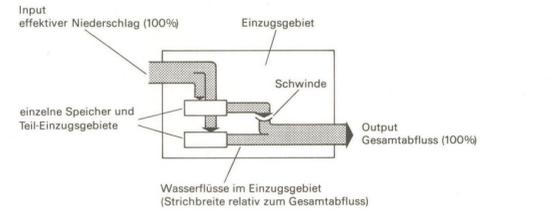


Autor R. Attinger
 Kartographie A. Brodbeck
 Gedruckt mit Unterstützung der Stiftung Marchese Francesco Medici del Vascello
 Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 2.3.1988
 © Geographisches Institut der Universität Bern, 1988

Strukturmodelle der Einzugsgebiete

In den Strukturmodellen werden die komplexen Fließverhältnisse in den Einzugsgebieten dargestellt, soweit sie nun bekannt sind. Eingezeichnet sind die grob quantifizierten Wasserflüsse und die einzelnen Speicherelemente. Den Input bildet der effektive Niederschlag, d. h. diejenige Niederschlagsmenge, die abflusswirksam wird. Im Gegensatz zu der Grösse der Wasserflüsse sind die dargestellten Speichergrossen nicht proportional zu den realen Speichervolumina.

EG Teilinzugsgebiete (nicht kartographisch abgegrenzt)
 Z₀, U ober- bzw. unterirdischer Zufluss
 A₀, U ober- bzw. unterirdischer Abfluss





ISBN 3-906290-43-3