

NATIONALES FORSCHUNGSPROGRAMM



DES SCHWEIZERISCHEN NATIONALFONDS

SCHLUSSBERICHTE ZUM SCHWEIZERISCHEN

MAB - PROGRAMM

NR. 30

1987

HYDROOÖKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN
IN EINEM ALPINEN EINZUGSGEBIET
(Testgebiet Grindelwald)
Ch. Leibundgut

IM RAHMEN DES UNESCO - PROGRAMMES

"MAN AND BIOSPHERE"

MAB: Ein nationales Forschungsprogramm in einem internationalen Rahmen

MAB ist ein integrales und interdisziplinäres Forschungsprogramm der UNESCO, das mit der Umschreibung "Mensch und Biosphäre" (Man and Biosphere) uns die für die Zukunft entscheidenden Fragen der Tragfähigkeit und Belastbarkeit eines Raumes, des Gleichgewichts zwischen Naturhaushalt und menschlicher Aktivität stellen will. Aus 14 Projekten, die alle wesentlichen Lebensräume unserer Erde abdecken, hat sich die Schweiz entschlossen, nur im Gebirgsprogramm Nr. 6 "Man's impact on mountain ecosystems" mitzuarbeiten. In der Folge übernahm der Schweizerische Nationalfonds dieses Programm mit dem Titel "Sozio-ökonomische Entwicklung und ökologische Belastbarkeit im Berggebiet" (Nationales Forschungsprogramm 55).

Ziel des Nationalen Forschungsprogrammes "MAB" ist es, in ausgewählten Regionen des Schweizerischen Berggebiets die Wirkungszusammenhänge zwischen wirtschaftlichen Aktivitäten, Landnutzung und Naturhaushalt aufzuzeigen und solche Prozesse zu erfassen, die die langfristige Sicherung des Berggebiets als Lebens-, Wirtschafts- und Erholungsraum in Frage stellen.

Die Hauptaufgaben bestehen somit auf der wissenschaftlichen Ebene in der praktischen und methodischen Bewältigung der Systemzusammenhänge, in der ursächlichen Klärung der festgestellten Prozesse und im empirischen Nachweis unerwünschter Entwicklungen in den Bereichen Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Auf der praktischen Ebene bestehen sie im Aufzeigen konkreter Kontroll- und Steuerungsmöglichkeiten mit dem entsprechenden Instrumentarium und im Austesten desselben in der Entscheidungspraxis.

Die Arbeiten in den Testgebieten Grindelwald und Aletsch wurden im Frühjahr 1979, im Pays-d'Enhaut anfangs 1980 und im Testgebiet Davos im Frühjahr 1981 aufgenommen.

MAB: un programme de recherche national dans un cadre international

MAB, qui signifie "Man and Biosphere", c'est-à-dire "Homme et Biosphere", est un programme de recherche intégré et interdisciplinaire de l'UNESCO, destiné à formuler les questions suivantes, essentielles pour l'avenir: quelles sont les atteintes qu'une région peut supporter? Jusqu'à quel point peut-on exploiter une région? Comment maintenir l'équilibre entre l'activité humaine et le milieu naturel? Parmi 14 projets consacrés aux principaux milieux vitaux de la terre, la Suisse a décidé de collaborer uniquement au programme de montagne no 6 "Man's impact on mountain ecosystems". Le Fonds national a été chargé de l'exécution de ce programme sous le titre "Développement socio-économique et capacités écologiques en montagne" (programme national de recherche 55).

Le but du programme national de recherche MAB Suisse est de démontrer, dans quatre régions exemplaires de montagne, les relations entre les activités économiques, l'utilisation du sol et l'écosystème, ainsi que de décrire et d'appréhender les phénomènes qui sont primordiaux pour la sauvegarde à long terme de nos régions montagneuses en tant qu'espace vital, économique et récréatif.

Les tâches primordiales sont d'ordre scientifique; il s'agit d'appréhender pratiquement et méthodologiquement, les relations complexes entre les éléments du système; d'analyser les causes des processus qui se déroulent et de démontrer des évolutions possibles avec leurs conséquences, dans les domaines de l'économie, de la société et de l'environnement. Les tâches d'ordre pratique sont de fournir des possibilités concrètes de contrôle et de direction des processus et de tester celles-ci dans la pratique.

Les travaux ont commencé au printemps 1979 dans les aires-test Grindelwald et Aletsch, au début de 1980 au Pays-d'Enhaut et au printemps 1981 à Davos.

HYDROÖKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN
IN EINEM ALPINEN EINZUGSGEBIET
(TESTGEBIET GRINDELWALD)

SCHLUSS BERICHT ZU PROJEKT 4.185

PD Dr. Ch. Leibundgut

Geographisches Institut
der Universität Bern
Hallerstr. 12
3012 Bern

1987

Schlussbericht zum Schweizerischen MAB-Programm Nr. 30, Bern

Redaktion: Dr. P. Messerli
Geographisches Institut
der Universität Bern
Hallerstrasse 12
3012 Bern

Publikationen: - Fachbeiträge zur Schweiz. MAB-Information
- Schlussberichte zum Schweiz. MAB-Programm

Bezugsadresse: Bundesamt für Umweltschutz
Bibliothek
CH-3003 Bern

Zitierung: Schlussber. Schweiz. MAB-Programm Nr. ...

VORWORT

Die vorliegende Arbeit befasst sich im Rahmen des UNESCO-Programms "MAN AND BIOSPHERE", Gebirgsprogramm Nr.6 - "Man's impact on mountain ecosystems" mit der Hydrologie des Raumes Grindelwald. Mit diesem Beitrag sollen die verschiedenen Studien zum "Teilprojekt Wasser" in einem Gesamtbild dargestellt werden.

An den Untersuchungen waren zahlreiche Mitarbeiter und Institutionen beteiligt. Als Kernarbeit konnte im Rahmen einer NF-Stelle H.U. Felber eine Dissertation ausführen. Hauptziel der Arbeit war die Erfassung des Wasserhaushaltes, die Detailuntersuchung der hydrologischen Hauptelemente und die Eingliederung der hydrologischen Resultate in die Projektsynthese (FELBER 1983). Dazu wurden als flankierende Untersuchungen mehrere Studentenarbeiten angesetzt: ASCHWANDEN (1982) zu Niederschlags-Abfluss-Beziehungen, BOLLIGER (1981) zur Bedeutung der Quellen, DERVEY (1981) zu Problemen der Karsthydrologie, SUSEDKA (1982) zum Temperaturregime ausgewählter Gewässer und WAELTI (1981) zur Hydrologie der Anggistaldenquelle. Ich danke Dr. H. U. Felber und den Kommilitonen für ihren persönlichen Einsatz.

Ergänzende Untersuchungen wurden durch die Zusammenarbeit mit den folgenden Institutionen ermöglicht: Abt. LLC des Physikalischen Institutes (Prof. Oeschger / U. Schotterer, Isotopenhydrologie), Anorganisch-chemisches Institut (Prof. Schindler, Hydrochemie), Landeshydrologie Bern (Stationenbau) und Gemeindebetriebe Grindelwald (Ch. Baumann, Beratung und Material). Allen Beteiligten möchte ich für Zusammenarbeit und Unterstützung den besten Dank aussprechen.

Wesentliche Unterstützung erfuhr das Projekt auch durch den Einsatz beträchtlicher Institutsmittel über mehrere Jahre (Werkstatt / Elektronik, Labor, Assistenten- und Studentenarbeiten, Folgeuntersuchungen durch Verfasser und Mitarbeiter). Den Mitarbeitern sei gedankt.

Als Teilprojektleiter danke ich dem Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung für die Finanzierung des Teilprojektes, Prof. B. Messerli und Dr. P. Messerli für die Förderung des Teilprojektes aus der Sicht der Programmleitung, Dr. U. Wiesmann und Dr. T. Scheurer für die Zusammenarbeit in der Synthesephase, und Dr. R. Weingartner für die vielen Diskussionen.

Ch. Leibundgut

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	III
Verzeichnis der Abbildungen	V
Verzeichnis der Tabellen	VII
Verzeichnis der Mitarbeiter	VIII
Zusammenfassung	IX
1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Untersuchungsgebiet	4
3. Methodik	8
3.1 Der hydroökologische Ansatz	8
3.2 Zum Problem der hydrologischen Datenerfassung	16
3.3 Ansätze zur Herstellung des Raumbezuges	21
3.3.1 Zur Uebertragung hydrologischer Daten auf die Fläche	21
3.3.2 Hydrotopenansatz	25
3.3.3 Konvergenzansatz	29
4. Vorerkundung und Konzeptbildung	34
5. Wasserhaushalt	41
5.1 Niederschlag	41
5.2 Verdunstung	45
5.3 Oberirdischer Abfluss	48
5.4 Unterirdischer Zu- und Abfluss	54
5.5 Rücklage und Aufbrauch	57
5.6 Wasserbilanz	59
6. Potential	62
6.1 Allgemeines	62
6.2 Einheitsflächenmodell - HYPOT	66
6.2.1 Grundwasserneubildung - GWBIL	70
6.2.2 Nutzungsbedingte Qualität des Sicker- wassers - QUSI	75

6.2.3	Reinigungswirkung des Bodens und des Untergrundes - REWI	76
6.2.4	Qualität des pro Einheitsfläche gebildeten Grundwassers - QUGRU	77
6.2.5	Flächendeckende Bewertung des hydrologischen Potentials - HYPOT	79
6.2.6	Resultate und Beurteilung	80
6.3	Analyse des Hauptelementes Quellwasser mittels Konvergenzansatz	85
6.3.1	Hydrologische Grundlagen	85
6.3.2	Detailanalyse der Kleckiquelle nach dem Konvergenzansatz	101
6.3.3	Detailanalyse der Tuftquelle nach dem Konvergenzansatz	110
6.3.4	Detailanalyse der Bachhaltenquelle nach dem Konvergenzansatz	116
6.3.5	Detailanalyse der Schattenhalbquelle nach dem Konvergenzansatz	122
6.3.6	Detailanalyse der Anggistaldenquelle nach dem Konvergenzansatz	128
6.3.7	Analyse weiterer Quellen und des Porengrundwassers	133
6.4	Zusammenfassende Betrachtung des hydrologischen Potentials	136
7.	Varianz	144
8.	Persistenz	147
9.	Wissenschaftliche Schlussfolgerungen	161
	Literatur	167

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

1. Uebersichtskarte zum Untersuchungsgebiet Grindelwald	5
2. Flussdiagramm für hydroökologische Untersuchungen	12
3. Die Hydrotopen im Raume Grindelwald	12
4. Modellvorstellungen zum "black-box-Ansatz"	29
5. Zur hydrologischen Untersuchung von Einzugsgebiets- Systemen ermittelt nach dem Konvergenzansatz	30
6. Flussdiagramm zum Konvergenzansatz	32
7. Hydrologische Teilräume	35
8. Hydrologische Gliederung	36
9. Hypothetisches Modell	37
10. Hydrologisches Messnetz	39
11. Karte des langjährigen mittleren Niederschlags	39
12. Die mittlere jährliche Verdunstung	46
13. Vergleichende Darstellung der mittleren monatlichen Abflüsse	50
14. Wasserbilanzmodell des Untersuchungsgebietes Grindelwald	60
15. Die wichtigsten Quellen im Raume Grindelwald	63
16. Flussdiagramm des Einheitsflächenmodells	67
17. Klassierte Grundwasserneubildung in räumlicher Verteilung	71
18. Ausschnitt aus der HYPOT Karte des Einheitflächenmodells	81
19. Die Verteilung der Quellwasser-Gesamthärte auf dem Hintergrund der geologischen Verhältnisse	91
20. Prozentualer Reservoirabfluss der Quellschüttung im Jahresverlauf	94
21. Die hygienische Belastung der Quellwasser	95
22. Tritiummodell und Tritiumgehalte von Quellen	99
23. Ganglinien der Quellschüttung und Wasser- temperatur der Kleckiquelle	101
24. Wasserbeschaffenheit der Kleckiquelle	101
25. Hydroökologisches Funktionsmodell der Kleckiquelle	104

26. Wasserbeschaffenheit der Tuftquelle	110
27. Hydroökologisches Funktionsmodell der Tuftquelle	112
28. Ganglinien der Quellschüttung und der Wassertemperatur der Bachhaltenquelle	116
29. Wasserbeschaffenheit der Bachhaltenquelle	117
30. Hydroökologisches Funktionsmodell der Bachhaltenquelle	118
31. Ganglinien der Quellschüttung und der Wassertemperatur der Schattenhalbquelle	122
32. Wasserbeschaffenheit der Schattenhalbquelle	123
33. Hydroökologisches Funktionsmodell der Schattenhalbquelle	125
34. Wasserbeschaffenheit der Anggistaldenquelle	128
35. Hydroökologisches Funktionsmodell der Anggistaldenquelle	129
36. Wasserbeschaffenheit der Hohensteinquelle	133
37. Wasserbeschaffenheit der Quelle Buessalp-Mittelläger	134
38. Ganglinien der Monatsmittel einzelner Parameter des Porengrundwassers bei Gryth	135
39. Ganglinien der Gesamtphosphat- und Ammoniumkonzentrationen der monatlichen Stichproben im Gletscher- und Lutschinenabfluss	137
40. Monatsmittel des Quellwasserangebotes und Quellwasserverbrauches im Jahresverlauf	139
41. Dauerkurve der Tagesmittelwerte der Kleckquelle	141
42. Regressionsgeraden des Basisabflusses der Quellen	142
43. Summenkurven von Niederschlag und Abfluss der hydrologischen Jahre 1980 und 1981	146
44. Abfluss der Lutschine-Gsteig 1924-1980	148
45. Die Ermittlung der Belastbarkeit	150
46. Kritische Flächen in den Quelleinzugsgebieten	156
47. Der Anteil kritischer und sehr kritischer Flächen der genutzten Quell-Einzugsgebietsflächen	157
48. Impuls-Wirkung-System am Beispiel der Wasserversorgung	162
49. Uebertragung von Abflussregimes am Beispiel der Lutschine-Schwendi	165

VERZEICHNIS DER TABELLEN

1. Hydrologische Datenerfassung in den verschiedenen Dimensionen	22
2. Ausscheidung von sechs hydrologischen Teilräumen im Untersuchungsgebiet Grindelwald nach charakteristischen Parametern	26
3. Unkorrigierte monatliche Niederschläge in Grindelwald - SMA	43
4. Mittlere monatliche Abflussmengen und Jahresmittel 1980/1981	49
5. Abflussmengen und Abflussspenden der Fliessgewässer	51
6. Mittlere oberirdische Abflüsse	53
7. Wasserbilanzwerte des hydrologischen Untersuchungsgebietes Grindelwald	59
8. Grundwasserqualität (QUGRU)	78
9. Klassierte Werte der Grundwasserneubildung (GWBKL)	79
10. Das hydrologische Potential (HYPOT)	79
11. Mittlere jährliche Schüttungsmengen der grossen Quellen	86
12. Daten zur Wasserbeschaffenheit der Quellen	89
13. Resultate der isotopenhydrologischen Untersuchungen der Hauptquellen	98
14. Schlüsseltabelle zur Raumbeurteilung der Quelleneinzugsgebiete	100
15. Raumbeurteilung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Kleckiquelle	107
16. Raumbeurteilung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Tuftquelle	114
17. Raumbeurteilung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Bachhaltenquelle	120
18. Raumbeurteilung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Schattenhalbquelle	126
19. Raumbeurteilung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Anggistaldenquelle	131
20. Dargebot der gefassten Quellen im Untersuchungsgebiet Grindelwald	140

VERZEICHNIS DER MITARBEITER

Dr. H.U. Felber, Doktorand und wissenschaftlicher
Mitarbeiter

H. Aschwanden)
H.J. Bolliger)
A. Dervey) Diplomanden GIUB
U. Susedka)
R. Wälti)

R. Weingartner, Assistent GIUB
H.R. Wernli, Laborant GIUB

U. Schotterer, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Physikalisches Institut, Abt. LLC

ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem MAB-Projekt Grindelwald wurden in interdisziplinärer Arbeit Grundlagen für die langfristige Nutzung und Sicherung des Gebirgsraumes erarbeitet. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem abiotischen Teilsystem Wasser. Ziel der Untersuchung war die Beschaffung der Grundlagen des Hydrosystems im Raume Grindelwald. Insbesondere sollte das hydrologische Potential, dessen Varianz und Persistenz ermittelt werden.

Zur Beantwortung der gestellten Aufgabe mussten methodisch auch neue Wege beschritten werden. Dazu wurde der hydroökologische Ansatz entwickelt. Darin werden die hydrologischen Daten soweit disaggregiert, dass damit die Fragen nach der Reaktion des Hydrosystems oder Teilen davon auf Einflüsse ändernder Landnutzung angegangen werden können. Während das induktive Aggregationsverfahren über Hydrotope nicht anwendbar war, konnten mit dem deduktiven Disaggregationsverfahren des Konvergenzansatzes gute Ergebnisse erzielt werden. Das Einheitsflächenmodell ermöglichte sogar eine flächendeckende Aussage. Allerdings beruhen diese Ergebnisse vorwiegend auf Bewertungen.

Die ermittelten langjährigen Wasserbilanzwerte ($N = 1'720$ mm, $V = 230$ mm, $A_0 = 1'445$ mm) dienen in erster Linie als Basis für die weitergehende Betrachtung des hydrologischen Hauptelementes Quellwasser und zur Einordnung der hydrologischen Werte in die langjährigen Reihen.

Das hydrologische Potential im Raume Grindelwald ist vor allem ein Trinkwasserpotential aus dem Quellwasserangebot. Dessen innerjährliche Variabilität ist jedoch sehr klein, da die Grundwasserspeicher auch in trockenen Jahren stets voll

aufgefüllt werden. Die Limitierungen von der mengenmässigen Seite treten in den Wintermonaten auf. Das minimale Potential von 50 l/s genügt heute gerade noch, um den Bedarf zu decken.

Die Potentiale und Persistenzen der einzelnen für die Wasserversorgung wichtigen Quellsysteme sind detailliert beschrieben. Die Persistenz der alpinen Quellsysteme in Bezug auf die Wasserbeschaffenheit ist grundsätzlich niedrig, da die Böden, soweit überhaupt vorhanden, meist geringmächtig sind. Teilweise wird dieser Nachteil jedoch durch grosse und tiefe Grundwasserspeicher mit langen Aufenthaltszeiten des Wassers wettgemacht.

Das Potential des Wassers ist nicht nur durch dessen Menge, sondern auch durch dessen Qualität bestimmt. Hydrochemisch ist die Eignung als Trinkwasser gegeben, hygienisch sind nicht alle Wasser einwandfrei. Unter Verwendung der chemischen Komponenten und der Isotopengehalte der Wasser als natürliche Tracer konnten wichtige Schlüsse bezüglich der Speichereigenschaften gezogen werden. Ueber hydroökologische Funktionsmodelle wurden die punktuell gewonnenen hydrologischen Daten auf die Fläche übertragen. Unter Einbezug der Nutzung konnte damit auch die "Belastbarkeit" der Einzugsgebiete beziffert werden. Gesamthaft zeigt sich, dass auch im wasserreichen Gebiet von Grindelwald Limitierungen bezüglich der Wassernutzung bestehen. In gütemässiger Hinsicht gibt es kritische Areale, in denen sich Nutzungsänderungen rasch negativ auf die Wasserqualität auswirken können.

Die anfänglich als gleichwertige Arbeitsbegriffe verwendeten Schlüsselgrössen Potential, Varianz und Persistenz erfuhren einen Bedeutungswandel. Das "hydrologische Potential" ist geeignet, als zentrale Schlüsselgrösse die entscheidenden Antworten auf die gestellten Fragen zu geben. Sowohl die Varianz als auch die Persistenz haben nur bestimmende Funktion für den Potentialbegriff.

1. Einleitung und Problemstellung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Hydrologie des Raumes Grindelwald und den sich aus der folgenden Projektfragestellung ergebenden hydrogeographischen Aspekten und deren Methodik.

Der Rahmen dieser Arbeit ist gegeben durch das MAB-Projekt Grindelwald, das auch die **Problemstellung** aufwirft (MESSERLI und MESSERLI 1978). Auch im alpinen Raum befindet sich heute die traditionelle Landwirtschaft in Veränderung in Richtung Intensivierung. Dies ist in verschiedener Hinsicht eine ungünstige Entwicklung. Teilweise kommt es auch zu Konflikten mit anderen Nutzungsformen, wie dem Tourismus oder dem modernen Verkehr. Im Projekt sollen die Grundlagen für die langfristige ökologische Nutzung des Gebirgsraumes erarbeitet werden. Als Arbeitsinstrument wurde dazu ein "**Mensch-Umwelt-System Grindelwald**" entwickelt, welches aus drei Teilsystemen besteht:

- a) dem natürlichen System
- b) dem Landnutzungssystem
- c) dem sozio-ökonomischen System

Das hydrologische Teilsystem ist innerhalb des natürlichen Systems angesiedelt.

Im Rahmen dieses Gesamtsystems war im "**Teilprojekt Wasser**" eine räumliche Erfassung der hydrologischen Verhältnisse im Raume Grindelwald vorzunehmen. Insbesondere galt es, das hydrologische Potential und schliesslich die Steuerbarkeit des Hydrosystems zu ermitteln. Die Resultate sollen in

praxisrelevanten Grössen bezüglich Nutzung und angenommenen Nutzungsänderungen angegeben werden. Ueber die Schlüsselgrössen "Potential, Varianz und Persistenz" wurde versucht, das Problem anzugehen. Die Varianz kennzeichnet die zeitlich-räumliche Verfügbarkeit der Wässer. Die Persistenz ist eine Angabe zur Reproduzierbarkeit des Hydrosystems innerhalb des Raumes. Unter Berücksichtigung der Varianz und der Persistenz können schliesslich die Fragen nach dem hydrologischen Potential der Hydrosysteme als Ganzes und einzelner Komponenten beantwortet werden.

Hydrologische Untersuchungen im angewandten Bereich werden üblicherweise in hydrologischen Problemräumen (Wassermangel, Gewässerverschmutzung) durchgeführt. In Grindelwald sind wir in einem wasserreichen Gebiet ohne offensichtliche Gewässerschutzprobleme. Die Besonderheiten des alpinen Klimas und der Raumfaktoren ergeben jedoch Probleme der Saisonalität. Grosse Diskrepanzen zwischen Naturdargebot und dem schliesslich nutzbaren Potential können nicht ausgeschlossen werden. Es ist daher zu ermitteln, ob für die Entwicklung Grindelwalds Limitierungen aus der Sicht der Wasserressourcen zu erwarten sind. Im weiteren muss abgeklärt werden, welche Konsequenzen für die Wassernutzung bei einem weiteren touristischen Wachstum und/oder einer grundlegenden Aenderung der landwirtschaftlichen Nutzungs zu erwarten sind.

Die Untersuchungen zum "Teilprojekt Wasser" im MAB-Grindelwald-Gesamtprojekt repräsentieren einen konkreten Fall hydroökologischer Forschung. Wie schon der Name sagt, wird das Wasser als Partialkomplex innerhalb einer integralen Problemstellung betrachtet. Entsprechend des hydroökologischen Ansatzes, mit dem hydrologische Probleme nicht nur isoliert als solche behandelt werden, wird im vorliegenden Projekt der Naturfaktor Wasser in seiner Stellung zur Umwelt untersucht. Die einzelnen methodischen Teilschritte Vorerkundung, Erfassung des Wasserhaushaltes, Analyse der hydrologischen Hauptelemente und Bestimmung des hydrologischen Potentials sollen auf ihre Tauglichkeit geprüft werden.

Ebenso sollen die aus anderen Forschungsarbeiten bekannten Schlüsselparameter zur tracerhydrologischen Untersuchung von Hydrosystemen auf ihre Allgemeingültigkeit hin untersucht werden.

Mit diesem Beitrag sollen die einzelnen Teilprojekt-Arbeiten auf dem Hintergrund der theoretischen Ueberlegungen zu einem Gesamtbild verknüpft werden.

2. UNTERSUCHUNGSGEBIET

Der Raum Grindelwald gehört zum **Tal der Schwarzen Lütschine**, die in Zweilütschinen mit der Weissen Lütschine aus dem Lauterbrunnental zusammenfliesst. Ueber das Bödéli, der Alluvialebene zwischen den beiden Oberländerseen, erreichen die vereinigten Lütschinen den Brienersee. Südgrenze der Lüt-schineneinzugsgebiete ist die **alpine Hauptwasserscheide** der Berneralpen auf der Linie Wetterhorn - Schreckhorn - Agassizhorn - Mönch - Jungfrau - Breithorn - Tschingelhorn. Dieses Gesamtgebiet umfasst 378 km², davon entfallen rund 85 km² auf den Raum Grindelwald.

Der obere Talabschnitt der Schwarzen Lütschine ist zum weiten muldenförmigen **Talkessel von Grindelwald** ausgeräumt. Der Untersuchungsraum ist weitgehend identisch mit dem Talkessel von Grindelwald (Abb. 1). Dieser wird gebildet durch die **para-autochthone Alpenrandstirn** einerseits und **Deckenfalten der helvetischen Wildhorndecke** andererseits. Diese zerfällt hier in mehrere gegen Norden überkippte isoklinale Dogger-Teildecken. Dazwischen sind die Flyschsedimente stark erodiert. Die stratigraphisch höheren Malm- und Kreidekompartimente sind während der alpinen Orogenese abgeschert worden und liegen heute nordwestlich des Faulhorns ausserhalb des Untersuchungsgebietes. Das Fallen der Doggerschichten zieht gegen Südosten unter die Flyschzone, welche dem autochthonen und para-autochthonen Sedimentmantel des kristallinen Aaremassivs vorgelagert ist. Die örtlich mit dem Kristallin verschuppte Sedimentbedeckung, die vor allem aus Malm- und unteren Kreidekalken besteht, bildet die markanten Steilstufen der Eigernordwand, des Mittellegigrates, des Mettenberges und des Wetterhorns. Generell ist das Kristallin erst südöstlich, ausserhalb des Untersuchungsraumes im Gebiet der beiden Gletscher aufgeschlossen. Die erwähnte, dem Sedimentmantel vorgelagerte **Flyschserie** liegt zusammen mit ultrahel-

vetischen (GUENZLER-SEIFFERT, WYSS 1938:36), bzw. helvetischen Aalénien-Schiefern (TROEHLER 1966:64) in einer tektonischen Störungszone, die quer durch das Untersuchungsgebiet zieht. Sie bildet die Sattelzone der Kleinen und Grossen Scheidegg. Bedingt durch die Ueberkipfung der Wildhorndecke und die ausserordentlich starke tektonische Beanspruchung liegen in Grindelwald kleinräumig wechselnde geologische und morphologische Verhältnisse vor (KIENHOLZ 1977).

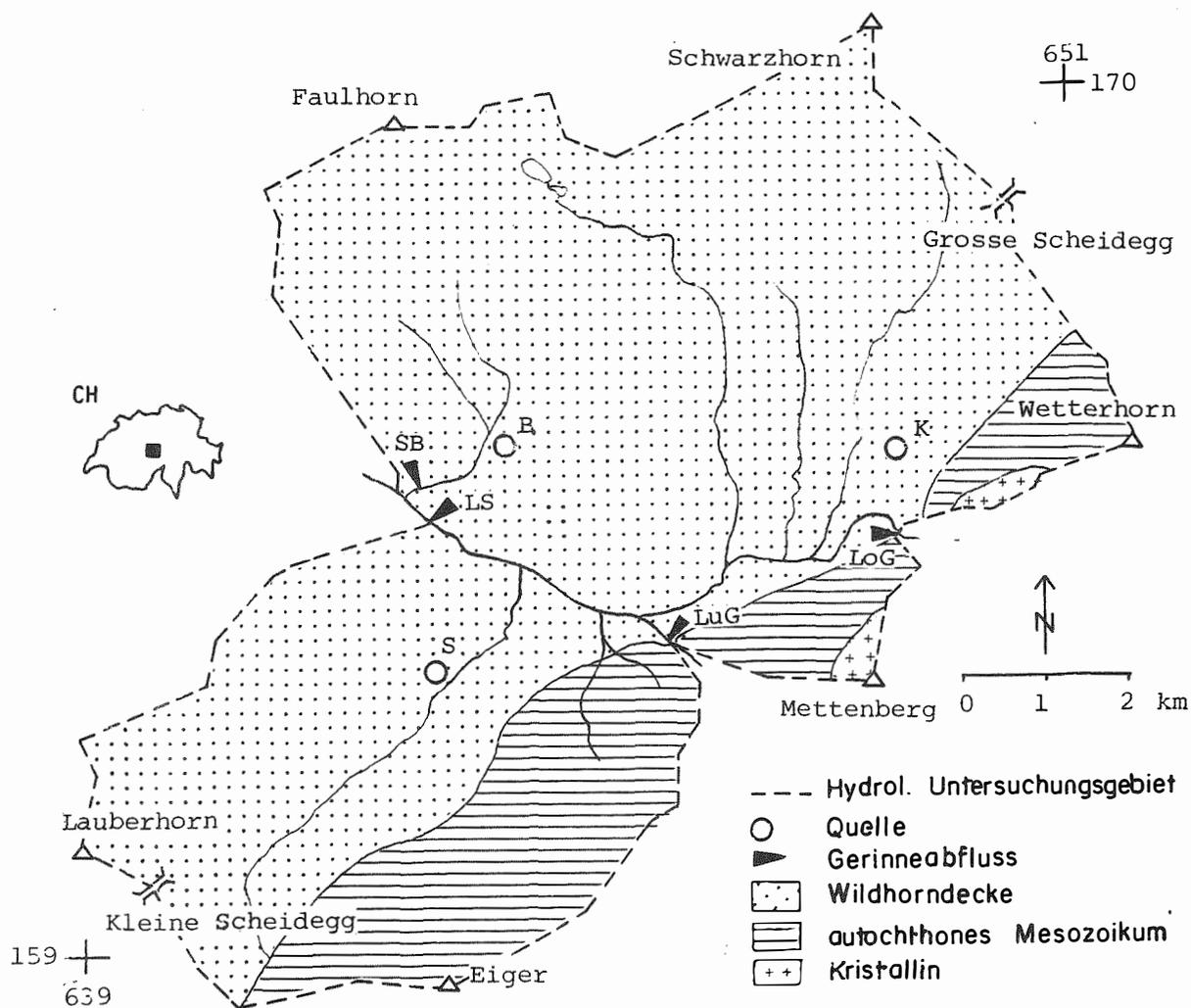


Abb. 1: Uebersichtskarte zum Untersuchungsgebiet Grindelwald.

Der Dogger des Helvetikums wird im Gebiet Grindelwald durch mächtige Serien von Aalénien und Bajocien aufgebaut. Die zu Rutschungen neigenden Aalénien-Tonschiefer im hinteren Teil des Tales sind wenig durchlässig, sichtbar an den häufigen Vernässungen. Die stratigraphisch darüberliegenden Aalénien-Eisensandsteine haben schiefelige und sandige Ausbildung und sind stark tektonisch beansprucht und zerklüftet. Die ebenfalls klüftigen Bajocien-Sandkalke im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes sind zum Teil verkarstet. Den darüberliegenden Malm und die Kreide finden wir erst wieder in den abgescherten Teildecken ausserhalb des Untersuchungsgebietes im Gebiet Schynigen Platte.

Der Talkessel von Grindelwald ist stark glazial überprägt. Wir finden Moränen des Haupttalgletschers und auch solche von Lokalvereisungen. Die Moränenbedeckung ist jedoch weniger zusammenhängend als dies der GEOLOGISCHE ATLAS DER SCHWEIZ, Blatt 396, zeigt (KIENHOLZ 1977). Grössere Areale sind zudem mit Schutt bedeckt. Dies besonders der alpinen Steilstufe entlang sowie unterhalb des Rötihorns und im Mehlbaumgraben. Ueber die Mächtigkeit der grundwasserführenden Talfüllung ist wenig bekannt. Sie dürfte allerdings wesentlich grösser sein als die mit der Grundwasserbohrung Gryth erreichten 40 m Tiefe.

Dem das eigentliche Untersuchungsgebiet bildende Talkessel sind die zwei vergletscherten **Einzugsgebiete des Oberen und Unteren Grindelwaldgletschers** vorgeschaltet. Sie liegen in einer tektonischen Schwächezone. Ihnen entfliessen die beiden Lütschinenarme, welche nach ihrem Zusammenfluss als Schwarze Lütschine quer zur Streichrichtung der Doggerfalten den Talkessel entwässern. Sie bilden wichtige Zuflüsse ins Untersuchungsgebiet.

Aus technischen und finanziellen Gründen hat das hydrologische Untersuchungsgebiet weiter eingeschränkt werden müssen. Nicht in die Untersuchungen eingeschlossen sind die Gebiete nördlich der Grossen Scheidegg und jene von Burglauenen und Wasserwendi. Der die Nordflanke des Männlichen entwässernde

Fallbach wird zwar für Wasserhaushaltsberechnungen nicht berücksichtigt (vgl. Abb. 1), die übrigen Untersuchungen in seinem Einzugsgebiet sind aber durchgeführt worden.

Aus der Struktur des Einzugsgebietes resultieren für unsere Problemstellung verschiedene Vorgaben: Es ist mit einer hohen Heterogenität bezüglich der räumlichen Verteilung der einzelnen Wasserhaushaltselemente zu rechnen. Aus der Verkarstungsfähigkeit der Sedimenthülle und der Dogger-Sandkalke drängt sich die Frage nach der hydrologischen Geschlossenheit des Gebietes auf. Fremdwasserzutritte sind sowohl in Gebieten der verkarsteten Doggermassen (Buessalp, Wasserwendi) als auch des Sedimentmantels denkbar. Aufgrund der Kessellage und der klimatischen Verhältnisse sind starke Saisonalitätseffekte und Höhenstufungen der hydrologischen Vorgänge zu erwarten.

Der Raum Grindelwald ist in zahlreichen Schriften in- und ausserhalb des MAB - Projektes aus verschiedenen Blickwinkeln beschrieben worden. Einen allgemeinen Ueberblick gibt GUTERSOHN (1973: 99ff). Zu einzelnen Themen der Kulturgeographie und des Naturraumes die den Untersuchungsraum näher beschreiben, sind die nachstehenden Schriften zu nennen: PFISTER (1984) zu den Grünlandgesellschaften, SCHEURER (1985) zur Pedologie, GROSJEAN (1986) zur Landschaftsbewertung, NAEGELI (1986) zur Berglandwirtschaft, WIESMANN (1986) zum Fremdenverkehr, und WIESMANN et al. (1987) zur Projektsynthese. Ergebnisse aus diesen Arbeiten wurden von uns als Grundlagen für die hydrologische Raumanalyse verwendet.

3. METHODIK

3.1 Der hydroökologische Ansatz

Als theoretische Grundlage zu den Untersuchungen im Projekt Grindelwald diente ein Ansatz, der als "Hydroökologie" umschrieben ist (LEIBUNDGUT 1977). Das Weiterdenken der Entwicklung der "Physikalischen Hydrologie" als der themenbezogenen Grundlagenarbeit zur raumbezogenen Analyse hydrologischer Vorgänge, führt zur "Hydroökologie".

Die Oekologie hat ihren Ursprung in den Biowissenschaften (HAECKEL 1866). Von der Biologie wird die Oekologie als die Wissenschaft von den Beziehungen der Lebewesen zueinander und zu ihrer Umwelt definiert. Inzwischen ist die Oekologie ein Arbeitsbereich vieler Disziplinen geworden, der oft multi- oder interdisziplinär betrieben wird. Dementsprechend wurde der Begriff Oekologie auch mit zahlreichen Inhalten gefüllt. Nur eine allgemeine Definition wie: "die Oekologie ist die umgreifende Lehre vom Naturhaushalt der Erde", scheint geeignet, den gemeinsamen Inhalt auszudrücken.

Geomorphologie und Vegetationsgeographie sind die wesentlichsten bisherigen Ansätze der Landschaftsforschung. Damit soll eine naturräumliche Gliederung in grosse bis mittlere Masstäbe erreicht werden. Boden, Wasser, Luft und Vegetation gelten als "ökologische Hauptmerkmale" (NEEF 1961), von denen aus mindestens ganz wesentliche Beiträge zur Landschaftsforschung erbracht werden können. Hydrologie im Sinne der Hydroökologie stellt einen weiteren solchen Ansatz dar. Darin wird ein systemtheoretischer Ansatz mit einem problemorientierten Ansatz verknüpft.

Wir stehen vor dem gleichen Dilemma wie die "Landschafts-ökologie". Diese will die Gesamtheit der Faktoren und ihrer Wechselbeziehungen, die eine Landschaft prägen, erfassen (vgl. LESER 1976). Gemäss dem ökologischen Ansatz sollen umfassende Oekotopbeschreibungen auf quantitativer Basis vorgenommen werden. SPAETH (1976:17ff) der HARD (1973) folgt, übt an diesem Forschungskonzept Kritik, da zwischen dem umfassenden Anspruch der Erfassung "aller den Landschaftshaushalt prägenden Faktoren und Kräfte" und dem Machbaren eine weite, wenn auch nicht unüberbrückbare Kluft besteht.

Von der Forschungspraxis ausgehend, streben wir mit der Hydroökologie nicht das Ziel einer umfassenden Landschaftsbeschreibung an, die von der Kenntnis aller eben dieser Landschaft prägenden Umweltfaktoren ausgeht. Vielmehr ist es das Ziel der Hydroökologie mit Hilfe des ökologisch relevanten Geofaktors Wasser einen Beitrag zur Landschaftsforschung zu leisten. In dieser Definition ist "der Mensch" allerdings nicht explizit genannt. Eine Hydroökologie ist demnach das Forschungsgebiet der Wasserhaushaltsbeziehungen zueinander und zu ihrer Umwelt. In der hydroökologischen Bearbeitung eines Ausschnittes der Erdoberfläche sollen die Beziehungen im System Wasser - Mensch qualitativ und quantitativ erfasst werden. Soweit zum Verständnis nötig, sind die Ueberlegungen zusammengefasst wiedergegeben.

Es stellt sich hier die grundsätzliche Frage des Einstiegs in die Problemstellung. Methodisch richtiger, aber in der Praxis wahrscheinlich nicht durchführbar, wäre es, möglichst von der Gesamtheit eines Oekotops her zu kommen. Bescheidener und durchführbar ist es, von einer aktuellen Fragestellung, einem konkreten raumrelevanten Problem auszugehen und mit der auch quantitativ arbeitenden Methodik der Hydroökologie einen Beitrag zum Verständnis eines Ökosystems zu leisten. Sie wird gekennzeichnet in Form der Begriffe Potential, Varianz und Belastbarkeit des Hydrosystems.

Gerade dieses Angehen von Problemen aus einer einseitigen Anschauungsweise heraus, die im Nützlichkeitsdenken begründet sein kann, hat in der Vergangenheit zu einseitigen, ökologisch schlecht abgestützten Resultaten geführt. Zu Beginn der Untersuchungen sind die tatsächlich relevanten "aktuellen" Fragen nicht immer bekannt. Oft ergeben sich diese erst aus den laufenden Arbeiten.

Als optimale Lösung bietet sich in dieser Situation eine Vorerkundung an. Damit soll in einer ersten Arbeitsphase ein Bild über die problemorientierte Relevanz der einzelnen Faktoren gewonnen werden. Als methodisch wichtiger Schritt folgt hier die Einengung der Faktoren auf die hydrologischen Hauptelemente. Nach erfolgter Konzeptbildung können dann in der nächsten Phase die vom Problem her gestellten Fragen gezielt angegangen werden.

In einem gedachten Raumausschnitt, vorwiegend der mittleren Dimension, müssen vorerst die einzelnen Wasserhaushaltselemente des Hydrosystems im Sinne von LESER (1976) ausgemessen werden. Damit kann der Raumausschnitt in seinen wesentlichen hydrologischen Grössen erfasst und in die räumliche Einheit der höheren Hierarchiestufe eingeordnet werden. Um die Frage nach der Sensitivität des Raumausschnittes oder einzelner Teile davon gegenüber anthropogenen Einflüssen beantworten zu können, muss der Raumausschnitt in Subeinheiten aufgegliedert werden. Diese müssen messtechnisch in genügend hoher Auflösung erfasst werden können. Solche Subsysteme können beispielsweise Hydrotope, Kleinsteinzugsgebiete oder Quellensysteme sein. Von der Datenerfassung her muss ein dafür geeigneter Ansatz herangezogen werden.

Das Wasser ist an fast allen Stofftransportvorgängen beteiligt. Innerhalb und zwischen den verschiedenen Geoelementen werden gelöste und suspendierte (organische und anorganische) Stoffe transportiert. Boden, oberflächennaher Untergrund, Relief und Vegetation werden durch das Agens Wasser

entscheidend beeinflusst. Damit soll auf die Bedeutung einer Hydrosystemanalyse innerhalb einer landschaftsökologischen Analyse hingewiesen werden. Es ist charakteristisch für das Hydrosystem, dass es im Sinne des "Transportmediums Wasser" (einwandfrei) messbar ist. Damit sind wesentliche Abläufe im landschaftlichen Oekosystem auch quantifizierbar.

Die einzelnen Wasserhaushaltsglieder sind kurzfristig witterungsbedingten, der langjährige Gesamtwasserhaushalt klimabedingten Schwankungen unterworfen. Diese Schwankungen sind aber auch eine Funktion des Bodens und des Substrates, sie sind abhängig vom hydrologischen Potential. Grösse und Verlauf dieser Schwankungen sind bedeutungsvoll für die Dynamik der Oekosysteme. Wasserregimetypen könnten daher zur Ausscheidung von Oekosystemtypen herangezogen werden.

Ueber die Raumbezogenheit hinaus soll also die Hydroökologie die Landschaft über die Haushaltsbeziehungen des Partialkomplexes Wasser quantitativ "erklären" helfen. Dafür ist der hydrologische Status oder das hydrologische Potential zu bestimmen. Dieses wird von der jeweiligen Problemstellung ausgehend aus dem natürlichen Dargebot ermittelt. Analog zu der von LESER (1976) geforderten ökologischen Varianz und Persistenz für ganze Oekosysteme, soll hier die hydroökologische Varianz des "Gewässers" (A-Schwankungen u.ä.) erfasst werden. Das Wasser als variabler anorganischer Standortfaktor wird oft gerade durch die Grösse der Schwankungen und der Extremwerte gekennzeichnet. Die hydroökologische Persistenz hingegen beziffert die Pufferkraft eines Hydrosystems gegenüber Eingriffen auf Teile des Systems. Die Einwirkungen können anthropogene oder natürliche Ursachen haben. Ein Hydrosystem kann aufgrund dieser Untersuchungen als stabil oder labil eingeteilt werden. Die Pufferkraft wird damit zu einem Kriterium für die Auswahl der möglichen Eingriffe, die aus ökonomischen und anderen Gründen vorgenommen werden sollen und sie wird somit zu einem Mass für die Bemessung der ökologisch tragbaren Eingriffsintensität.

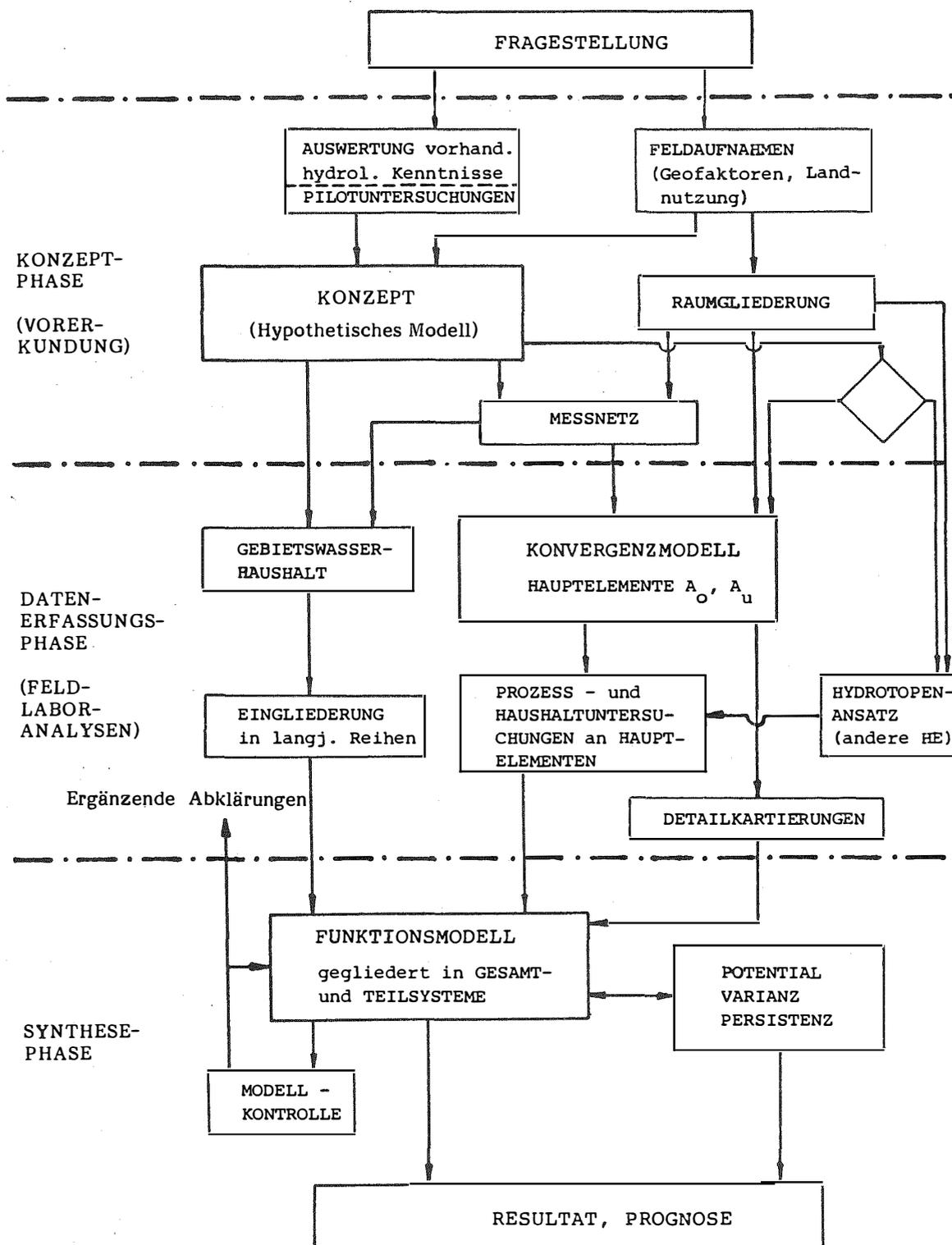


Abb. 2: Flussdiagramm für hydroökologische Untersuchungen. Damit kann ein Hydrosystem unter der Fragestellung der Reaktion auf Nutzungsänderungen im Einzugsgebiet untersucht werden. HE: Hauptelemente. A_o, A_u: ober- und unterirdischer Abfluss.

Die Kennwerte können wie folgt definiert werden:

Potential: Die "Leistungsfähigkeit" des Hydrosystems und der einzelnen hydrologischen Komponenten in Bezug auf die Fragestellung. Das Potential ist eine Folge der Fragestellung und somit eine Variable.

Varianz: Die Veränderlichkeit und Schwankungsbreite des Hydrosystems und einzelner Komponenten in bestimmten Zeitspannen. Es stehen die Zeiträume Jahr, Sommer und Winterhalbjahr und Monat sowie die Extremwerte im Vordergrund.

Persistenz: Stabilität, Widerstandskraft und Puffervermögen des Hydrosystems und einzelner Komponenten gegenüber Veränderungen von Einflussgrößen. Im vorliegenden Programm soll die Stabilität des Systems und die Belastbarkeit bei gegenüber verschiedenen Nutzungen untersucht werden.

Diese grundsätzlichen Ueberlegungen waren nun gemäss der Problemstellung im MAB-Projekt Grindelwald umzusetzen. Weil das Gesamtprogramm Grindelwald an sich auch ökologisch ausgerichtet ist, ist der Umgebungsbereich der eigentlichen hydrologischen Arbeiten abgedeckt. Die Beziehung des Wassers zu den Umweltfaktoren, wie sie innerhalb einer hydroökologischen Aufnahme bearbeitet werden müssen, liegen hier im Arbeitsfeld anderer Arbeitsgruppen. Als Beispiel für den Umgebungsbereich seien aufgeführt: die Beziehung landwirtschaftliche Nutzung ---> Abfluss und Siedlungsstruktur ---> Wasserqualität, in denen jeweils die Unterlagen der erstgenannten Beziehungsteile mindestens teilweise von anderen Arbeitsgruppen bereitgestellt wurden.

In einem nach dem hydroökologischen Ansatz bearbeiteten "Teilsystem Wasser" im Projekt Grindelwald blieb die Erfassung der Wasserhaushaltsglieder eine Basis der hydrologischen Arbeiten. Die wasserhaushaltliche Quantifizierung ist Bedingung für die Prüfung, ob die Resultate der Disaggregation und der Detailanalyse in ihren Grössenordnungen richtig sind. Quantitative Grundlagen einzelner Wasserhaushaltskomponenten (Grundwasser, Quellwasser, Abfluss) sind aber auch nötig, zur Erfassung der Wasserqualität und zur Berechnung der Versorgungsgrössen.

Unter Berücksichtigung der alpinen Verhältnisse, die bezüglich der Datenerfassung besondere Probleme stellen, und zur Einhaltung der Rahmenbedingungen "Praxisrelevanz und Flächendeckung" wurde die hydroökologische Methodik eingesetzt und wo nötig weiterentwickelt (vgl. Kap. 3.3.). Sie lässt sich in drei Teilschritte auflösen (Abb. 2):

1. Konzeptphase : Vorerkundung, Konzeptbildung, Ermittlung der Hauptelemente, Aufbau des Messnetzes

2. Datenerfassungsphase : Analyse der Hauptelemente (Bsp.: Konvergenzansatz), experimentelle Kontrollen, Wasserhaushaltsbestimmung, Detailkartierungen

3. Synthesephase : Modell des Hydrosystems, Bezifferung von Potential, Varianz und Persistenz

Ueber die Begriffe des Potentials, der Varianz und der Persistenz können direkt verwertbare Resultate an Nachbardisziplinen geliefert werden (LESER 1976). Die **Wasserhaushalts-Untersuchungen** im Einzugsgebiet dienen der **räumlich-zeitlichen Einbettung** der Resultate und der **Kontrolle** der Daten aus den hydrologischen Detailstudien (Hauptelemente).

Ausgehend von der Fragestellung erfolgte eine Vorerkundung. Diesem Schritt kommt eine entscheidende Bedeutung zu, da hier die richtungsweisenden Entscheide bezüglich der hydrologischen Untersuchungen fallen. Die bekannten naturräumlichen Gesetzmässigkeiten, insbesondere diejenigen des Wasserkreislaufes, lassen ein "hypothetisches Wasserhaushaltsmodell" als Arbeitshypothese mit einiger Sicherheit relativ schnell aufbauen. Ebenfalls im Sinne einer Hypothese werden die Hauptelemente herauskristallisiert.

Die Hauptelemente sind die entscheidenden hydrologischen Grössen für die Bestimmung des Potentials. Dieses ist abhängig von der jeweiligen Fragestellung. Im vorliegenden Falle ist es vorwiegend ein Trinkwasserpotential. Insbesondere für die Hauptelemente, soweit nötig aber auch für die übrigen Wasserkreislaufglieder, wird die Varianz und die Persistenz bestimmt. Das mit diesen Begriffen beschriebene Modell des Hydrosystems kann über unabhängige experimentelle Untersuchungen (Bsp. Markierversuche) getestet werden. Mit den hydroökologischen Kennwerten "Potential, Varianz und Persistenz" werden die problembezogenen fundamentalen Grössen des Hydrosystems gekennzeichnet.

3.2 Zum Problem der hydrologischen Datenerfassung

Die Datenerhebung erfolgt hauptsächlich in der zweiten Phase der hydroökologischen Methodik (vgl. Abb. 2). Sie ist auch hier - wie überall in den Geowissenschaften - ein Kardinalproblem. Die Qualität der Resultate kann nicht besser sein als diejenige der Rohdaten. Es ist aber ein meist lösbares Problem. Die Messtechniken zur Erfassung der einzelnen Parameter sind gemessen an den Anforderungen unterschiedlich entwickelt. Teilweise vermögen sie Resultate in hoher Qualität und Auflösung zu erbringen. Teilweise sind sie aber auch recht einfach geblieben. In ihrer Struktur sind es meist Punkt-Messwerte. Die direkte Erfassung hydrologischer Daten flächenhaften Charakters ist bis heute nur in Ausnahmefällen möglich (Bsp.: Niederschlagsmessung mit Radar). Zum Stand der Messtechniken zur Erfassung der im Projekt Grindelwald wichtigen Elemente des Hydrosystems wird nachstehend ein Ueberblick gegeben.

Die Erfassung repräsentativer Niederschlagswerte ist nach wie vor ein Problem in der Hydrologie. Es ist erstaunlich, dass auf diesem Sektor in den vergangenen Jahren nur wenige Fortschritte erzielt worden sind. Dies ist umso bedeutsamer, als dass der Niederschlag das Eingangsglied in die Wasserbilanz darstellt.

Die Messung mittels herkömmlicher Geräte ist mit beträchtlichen Fehlern behaftet. Die angegebenen Spannen liegen zwischen wenigen bis 35% für Monatssummen und bis zu 25% für Jahressummen (VISCHER & SEVRUK 1975; KELLER 1980). In Gebieten mit vorwiegend Schnee-Niederschlag ist die Messung noch problematischer. Für die systematisch bedingten Messfehler liegen heute gut begründete Korrekturverfahren vor (SEVRUK 1986). Obgleich nach dem Stand der Kenntnisse keine hydrologischen Berechnungen ohne korrigierte Niederschlagswerte mehr verwendet werden dürften, ist die Anwendung von Korrekturverfahren noch nicht allgemein verbreitet.

Bezüglich der Frage nach einer flächendeckenden Aussage der Niederschlags-Punktmesswerte muss auch die Repräsentativität der Messstandorte für ein Einzugsgebiet gelöst werden. Für viele Fragen der angewandten Hydrologie sind Kenntnisse des wahren Gebietsniederschlags nicht nur für Mittelwerte, sondern auch für Einzelereignisse wichtig. Da die Niederschlagsmessung ihrem Wesen nach eine räumliche Stichprobe darstellt, muss eine ausreichende Dichte von Stationen mit genügenden zeitlichen Auflösungsvermögen vorhanden sein. Die jeweiligen Untersuchungsziele bestimmen die Anforderungen. Richtwerte finden sich in RODDA et al. (1976). Für die Untersuchungen in Grindelwald wurde mit 14 Stationen eine hohe Dichte von 5.8 km² pro Station erreicht. Moderne Verfahren zur direkten Erfassung des Gebietsniederschlags werden zwar forschungsmässig eingesetzt (u.a. Radarmethoden). Sie vermochten aber bis heute keinen entscheidenden Fortschritt in die Praxis zu bringen, da die Eichprobleme nicht gelöst sind (JOSS u.a. 1969, ATTMANNSPACHER 1976).

Ganz andere Verhältnisse finden wir bei der Messung des Gerinneabflusses vor. Die Messfläche rückt hier auf den Messquerschnitt des Gerinnes zusammen. Mit der Wasserstandsmessung wird die zeitliche Variation des Abflusses erfasst. Dieser kontinuierliche Messteil bietet wenig Schwierigkeiten und ist mit nur geringem Fehler behaftet. Unter Ausnützung der "Geländevorzüge" (Brücken u.a.) konnten für die Untersuchungen in Grindelwald mit vertretbarem Aufwand gute Messprofile hergerichtet werden. Gesamthaft waren 9 Abflussmessstationen in Betrieb. Die klassische Methode der Eichung mit dem hydrometrischen Flügel (Stromfaden-Geschwindigkeitsmessung) mit nachfolgender doppelter Integration bringt meist genaue Resultate mit einem Fehler <5%. Das Resultat kann verbessert werden, wenn die Messprofile stabil ausgebaut werden können (LANDESHYDROLOGIE 1982). Auch neuere Verfahren wie die Tracerverdünnungsmethode in turbulenten Gerinnen erbringen Resultate von gleicher Güte (FISCHER 1982).

In Grindelwald wurden beide Techniken je nach Erfordernis eingesetzt. Noch nicht eingesetzt werden konnte die neuste messtechnische Konstruktion auf diesem Gebiet, das mikroprozessorgesteuerte Abflussmessgerät zur Messung turbulenter Abflüsse (BENISCHKE und HARUM 1985). Der wesentliche Vorteil gegenüber den bisherigen Verfahren besteht darin, dass die Messung selbst in kurzer Zeit (15 - 20 Min.) erfolgen kann und das Resultat sofort zur Verfügung steht. Ein Graphikplot erlaubt die Kontrolle der Messgüte. Vergleichsmessungen im Rahmen des Kenya - Projektes an Gerinneabflüssen des Mount Kenya ergaben Differenzen von $\pm 4\%$ zu den herkömmlichen Flügelmessungen (LEIBUNDGUT 1984b). Heute steht eine Eigenentwicklungen der Abteilung Gewässerkunde des GIUB mit weiterentwickelten Programmen zur Verfügung (LUDER 1986).

Mit dem Abfluss wird im Messquerschnitt ein Resultat mit starkem räumlichen Mittelwert- bzw. Summencharakter erhoben. In diesem Sinne ist der Wert für das ganze Einzugsgebiet gültig. Unterschreitet dieses einen gewissen Homogenitätsgrad, gilt der ermittelte spezifische Abfluss in flächenhafter Hinsicht nur noch bedingt. Die im Abflusswert gespeicherte qualitative und quantitative Information zur Wassermenge und -beschaffenheit kann mit geeigneten Verfahren aufgeschlüsselt werden (LEIBUNDGUT 1984c).

Die Erfassung der Verdunstung, genauer der aktuellen Evapotranspiration (ET), ist nach wie vor ein schwieriges Unterfangen. Gute Resultate - selbst für den Standort - sind nur mit viel Aufwand zu erhalten. Die Verdunstung im Einzugsgebiet kann nicht direkt gemessen werden. Ihrer Struktur nach ist die Verdunstungsmessung wiederum eine räumliche Stichprobe in einem extrem dynamischen Umfeld. Auch hier genügen Mittelwerte längerer Zeitperioden den modernen Anforderungen nicht mehr. Eine kontinuierliche Erfassung ist deshalb für viele Fragestellungen unumgänglich. Neuere Untersuchungen, welche den Wasserhaushalt mit dem Wärmehaushalt koppeln, sind ermutigend (LANG & SCHAEDLER 1980). Unter bestimmten Voraussetzungen können Punktmesswerte auf die Fläche über

tragen werden (SCHAEDLER 1980). Moderne Methoden wie die Fernerkundung können in Zukunft weiteres zur flächenhaften Erfassung des dazu nötigen Strahlungshaushaltes beitragen. Einen "state of the art report" zur Verdunstung gibt LANG (1978).

Die Verdunstung ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig (Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, Wasserangebot, Albedo, Bewuchs u.a.) und daher sehr schwierig zu erfassen. Obschon die aufwendige direkte Bestimmung der Verdunstung durch Wägung von Lysimetern lokal mit guter Genauigkeit möglich ist, lassen sich die so erhobenen Messungen kaum auf ein grösseres Gebiet übertragen.

Deshalb wurde bis heute die Verdunstung eines Einzugsgebietes häufig aus der Wasserbilanzgleichung als Restglied berechnet, wobei die Rücklagen und der Aufbrauch unberücksichtigt bleiben da sie nicht bekannt sind oder vernachlässigt werden können (LEIBUNDGUT 1978a). Dazu ist jedoch Voraussetzung, dass langjährige Messreihen vorhanden sind und die Genauigkeit der Niederschlags- und Abflussmessung genügend gross ist. Die Niederschlagsmessung ist im alpinen Gebiet jedoch ebenfalls problematisch, und die genaue Erfassung der Abflussmengen von Gebirgsbächen ist auch nicht leicht. Dazu kommt die Bedingung, dass die solcherart betrachteten Einzugsgebiete hydrologisch abgeschlossen sein sollten oder es müssen die Fremdwasserzutritte und/oder -verluste mengenmässig bekannt sein.

In Grindelwald erfolgte die Bestimmung der Verdunstung indirekt nach dem Verfahren von PENMAN (1956) aus der Strahlungsbilanz und der Ventilation.

Die Messtechniken in der Grundwasserhydrologie haben sich in neuerer Zeit stark entwickelt. Moderne Methoden, darunter auch die Tracerhydrologie, brachten Fortschritte in der Grundwasserforschung. Sie ermöglichen u.a. die Ausdehnung der herkömmlichen Punktmessung auf die Fläche (LEIBUNDGUT

u.a. 1981). Die Erfassung der Quellwassersysteme in Grindelwald wäre ohne den Einsatz von Tracermethoden in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich gewesen.

Die moderne Technik erlaubt es, in allen Bereichen die kontinuierliche Datenerfassung anzuwenden und dort, wo Messintervalle vorgegeben sind (Bsp. Wasserproben), die Messintervalle durch eine geeignete Steuerung zu optimieren. Die Möglichkeit über data-loggers mit Hilfe der Kleincomputertechnik auch zahlreiche Komponenten parallel nach vorprogrammiertem Ablauf messen zu können, eröffnet ganz neue Perspektiven.

Im Grindelwaldprojekt wurden sowohl klassische (Bsp. Niederschlag) als auch moderne (Bsp. Tracerverfahren) Techniken zur Erfassung der hydrologischen Daten angewendet. Um das Aufwand-Ertrags-Verhältnis möglichst günstig zu gestalten, wurde für jeden Messpunkt die optimale Lösung gesucht, wobei die Randbedingung der Vergleichbarkeit der Messwerte berücksichtigt blieben. Entsprechend dem methodischen Vorgehen (vgl. Kap 3.1.) wurden die messtechnisch grössten Aufwendungen zur Erfassung der Hauptelemente oberirdischer Abfluss und Quellschüttung erbracht (vgl. Kap. 5.3. und 6.).

3.3 Ansätze zur Herstellung des Raumbezuges

Der Raumbezug muss problemadäquat sein. Bei der vorliegenden Untersuchung geht es hauptsächlich um die Gliederung des Gesamtraumes in messtechnisch und raumanalytisch erfassbare Einheiten, in denen die hydrologischen Daten mit den Merkmalen der Raumausstattung soweit verknüpft werden können, dass die Frage nach der Reaktion des Systems oder Teilen davon auf Nutzungsänderungen gelöst werden kann.

3.3.1 Zur Uebertragung hydrologischer Daten auf die Fläche

Flächendeckende Aussagen sind eine Forderung hoher Priorität im vorliegenden Projekt. Die theoretischen Hintergründe sollen deshalb kurz diskutiert werden.

Grundsätzlich lassen sich die Verfahren in drei Gruppen einteilen:

- a) Aggregationsverfahren
- b) Verfahren der Disaggregation
- c) Regionale Uebertragungsverfahren

Ein Beispiel für die Gruppe der Aggregationsverfahren ist der Hydrotopenansatz (vgl. Kap. 3.3.2). Sie basieren auf der topologischen Dimension und setzen homogene Teilräume voraus, über deren Kennwerte schliesslich aggregiert wird. Der in Kapitel 3.3.3 beschriebene Konvergenzansatz kann als Disaggregationsverfahren, wie sie von STREIT u. PAUS (1985) erläutert worden sind, bezeichnet werden. Die an einem Punkt gewonnenen Informationen werden aufgeschlüsselt und Teilräumen bzw. Subspeichern zugeordnet. Mit dem Konvergenzansatz können auch hydrologisch heterogene Räume bearbeitet werden.

Die Aggregations- und Disaggregationsverfahren eignen sich besonders um in Untersuchungsgebieten (allgemein in geschlossenen Räumen) flächendeckende Aussagen zu erzielen. Die Verfahren der regionalen Uebertragung werden vorzugsweise bei grossräumigen hydrologischen Studien zur Uebertragung von Daten und Modellen angewendet. Die im Geographischen Institut Bern erarbeitete Studie über die Abflussregimes der Schweiz bildet dazu ein Beispiel (ASCHWANDEN, WEINGARTNER u. LEIBUNDGUT 1986).

Die Wahl der Verfahren richtet sich nach der Grösse und der Homogenität des zu betrachtenden Raumausschnittes. Ueberschneidungen sind möglich, da nicht alle Verfahren eindeutig nur einer Gruppe zugehören.

Tab. 1: Hydrologische Datenerfassung in den verschiedenen Dimensionen.

Einzugsgebiet	Dimension	Beispiel	Fläche
Mikro-EG	topologisch	Sperbelgraben	a, ha
Meso-EG	chorisch	Langetental Grindelwald	km ² <100 (500)
Makro-EG	(regional-) zonal	Aare Rhein	km ² >100 (500)

Die Umsetzung der meist punktförmig erhobenen Daten in planungsrelevante Dimensionen stellt die schwierigere Aufgabe dar als die Datenerfassung. Das Kernproblem der Umsetzung punktförmig erhobener Daten auf den Raum bleibt in der Hydrologie vorläufig bestehen. Etwas überspitzt könnte formuliert werden, dass die Konzentration der Anstrengungen zur Verbesserung der Messtechniken sogar vielfach vom Uebergangproblem weggeführt hat.

Wie in der Oekologie lassen sich auch in der Hydrologie die drei Gruppen der topologischen, der chorologischen und der regionalen Dimension unterscheiden (Tab. 1). Diesen Dimen-

sionen können Mikro-, Meso- und Makro-Einzugsgebiete zugeordnet werden. Das Einzugsgebiet bildet in der Hydrologie grundsätzlich die räumliche Bezugsebene. Damit wurde auch im Grindelwald-Projekt gearbeitet.

Unter Mikro Einzugsgebieten verstehen wir Einzugsgebiete im Aren- und Hektarenbereich bis wenige Quadratkilometer mit weitgehend homogener Ausstattung. In der Hydrologie spricht man je nach Forschungsziel von Repräsentativ- und Experimentalgebieten oder auch von Naturmodellen oder Testgebieten. Es sind dies die klassischen Untersuchungsgebiete in der Hydrologie, insbesondere die Arbeitsfelder der wissenschaftlichen Einzugsgebietshydrologie. In diesen überschaubaren Einzugsgebieten wurden oder werden mehr oder weniger sämtliche Fragen der Hydrologie erforscht (Wasserbilanz, Wasserhaushaltsprozesse, Einflüsse wechselnder Landnutzung u.a.). Dank ihrer Kleinheit und Homogenität lassen sich die einzelnen Parameter quantitativ ermitteln und die Einzugsgebiete auf dieser Grundlage modellieren. Der Messung selbst ist dabei bezüglich Genauigkeit höchste Beachtung zu schenken. Es ist dies die topologische Dimension der Hydrologie. In diesem Sinne ist der Topologie-Begriff sogar etwas klassisch Hydrologisches. Die Messwerte haben für das betreffende Einzugsgebiet volle Gültigkeit. Wie weit die Uebertragbarkeit der Einzugsgebietswerte auf grössere Flächen zulässig ist, ist noch nicht befriedigend geklärt. Mit dem Hydrotopenansatz wird versucht dieses Ziel zu erreichen. Wir dürfen jedoch nicht darüber hinwegsehen, dass die Idee der "repräsentativ basins", wie sie im Rahmen der IHD bearbeitet worden ist, nicht den gewünschten Erfolg gebracht hat. Die Bausteine in Form von Testflächen sind zwar in aller Welt errichtet und bearbeitet worden, doch die zusammenführenden Untersuchungen fehlen weitgehend.

Die Meso-Einzugsgebiete stellen die planungsrelevante Dimension in der Hydrologie dar ($10 - 100 \text{ km}^2$). Die chorische Dimension ist damit die im Vordergrund stehende Bezugsfläche der angewandten Hydrologie. Die Schwierigkeiten liegen einerseits auf der Uebertragung der Messwerte auf Einzugsge-

biete ohne Direktmessung, andererseits in der Zuordnung der Messwerte innerhalb des Einzugsgebietes. Hydroökologisch scheint uns der zweite Weg von grösserem Interesse zu sein, da im betreffenden Gebiet selbst gemessen wird. Die Einzugsgebiete dieser Dimension sind aber meist so heterogen in ihrer Ausstattung, dass die Datenübertragung Schwierigkeiten bereitet. Auch können Resultate von Testflächen nur in Teilaspekten auf das ganze Einzugsgebiet übertragen werden (Bsp.: Niederschlag).

Das Vorgehen über den Hydrotopenansatz bereitet infolge ungenügender Homogenität meist Schwierigkeiten (vgl. Kap. 3.3.2.). Hingegen hilft der Wasserhaushaltsansatz häufig scheinbar noch weiter. Dank der Tatsache, dass der Niederschlag und der Abfluss - und damit als Restglied auch die Verdunstung - in dieser Dimension oft hinreichend genau quantitativ bestimmt werden kann, lassen sich hydrologische Bilanzen erstellen. Damit können hydrologische Dargebote als Planungsgrundlage ermittelt werden. Das Uebertragungsproblem wird durch diese integrale Betrachtung aber gleichsam verdrängt. Die mittlere Dimension ist weniger geeignet um darin detaillierte Prozessstudien durchzuführen. Trotzdem werden gerade in dieser Dimension planungsrelevante Aussagen erwartet (SPREAFICO 1986). Die Problematik der Makro-Einzugsgebiete wird hier nicht diskutiert.

Die Ausführungen zur Frage der Datenerhebung implizieren, dass, es - abgesehen vom Genauigkeitsanspruch - in den verschiedenen Dimensionen kaum unterschiedlicher Messtechniken bedarf. Der Uebergang von der topologischen zur chorologischen Dimension führt aber durch ein messmethodisches Filter. Das notgedrungen weitere Messraster verlangt eine andere Schwerpunktsetzung (Bsp.: zeitliche Auflösung) bei der Datenerhebung und insbesondere die Durchführung von Stützpunktmessungen zur Einordnung der gesamten Messungen in einen räumlich und zeitlich grösseren Rahmen. Die beiden in Grindelwald angewendeten Methoden sollen im folgenden umrissen werden.

3.3.2 Hydrotopenansatz

Ueber die Gliederung des Naturraumes nach hydrologisch relevanten (Steuer-) Faktoren werden **homogene Teilräume** ausgeschieden. Durch Messung typischer Hydrotopen werden anschliessend die Teilräume hydrologisch charakterisiert. Aus messtechnischen Gründen sollten die Hydrotopen dabei Kleinst-einzugsgebieten entsprechen. Es ist aber denkbar, dass mit diesem Vorgehen die Einzugsgebietsbasis verlassen wird. Die Messwerte (und Modelle) werden direkt von den Hydrotopen auf die Teilräume übertragen. Mit der **Aggregation der Teilräume** kann der Gesamtraum beschrieben werden.

Die Landschaftsökologie hat, vor dem gleichen Problem stehend, die Lösung darin gesucht und gefunden, in konsequenter Weise über die Berücksichtigung des landschaftsökologischen Regelkreises des Standortes unter Wahrung der Homogenitätsbedingungen zu gültigen flächenhaften Aussagen zu kommen. Dieser Weg ist in der Hydrologie nicht ohne weiteres gangbar, weil der **Homogenitätsanspruch**, wie erwähnt, mit dem Einzugsgebiets-Ansatz oft nicht zu vereinbaren ist. Hier muss allerdings eingeräumt werden, dass dieser Weg kaum konsequent begangen wird. Jedenfalls fehlen in der Literatur Beispiele zur praktischen Ausführung. Für Teilaspekte jedoch scheint dieses Vorgehen durchführbar, wie Hochwasservorhersagemodelle zeigen.

In Grindelwald standen wir vor dem doppelten Problem, dass die Voraussetzungen zur Anwendung sowohl des Einheitsflächen- als auch des Hydrotopenansatzes nicht gegeben waren. Vom Projekt her wurden als kleinste Flächeneinheiten die sogenannten **"Einheitsflächen"** ausgeschieden. Dies sind zwar bezüglich Höhe über Meer, Exposition, Hangneigung und Vegetationsbedeckung auch **"homogene" Teilflächen** aber nicht im Sinne der Hydrologie, da sie nicht auf allen hydrologisch relevanten Grössen beruhen. Für das hydrologische Teilprojekt konnten sie vorerst nicht als Arbeitsinstrumente übernommen werden. Erst in der Synthesephase mit den stark er-

weiterten Kenntnissen der regionalen Hydrologie konnten die "Einheitsflächen" über das flächendeckende hydrologische Modell (vgl. Kap. 6.2.) miteinbezogen werden.

Zur **Hydrotopenausscheidung** in Grindelwald wurden drei Arbeitskarten erarbeitet. In der Karte der Permeabilität wurde jeder geologischen Einheit des Testgebietes eine Permeabilität (Durchlässigkeit) zugeordnet. Grosse Durchlässigkeit weisen grundsätzlich die Argovien-Kalke und der Obere Malmkalk der Wildhorndecke, das Autochton, das Berriasien und das Quartär ohne Moränen auf. Eine mittlere Permeabilität wird den Gesteinen des Bajocien und des Callovien der Wildhorndecke zugeordnet. Nur kleine Durchlässigkeiten weisen die Schiefer des Aalénien, des Callovien, des Oxfordien und des Argovien der Wildhorndecke auf. Die restlichen Aalénien-gesteine, der Flysch und die Moränen weisen eine sehr grosse Spanne an Durchlässigkeiten auf, so dass sie nur als "uneinheitlich" klassiert werden können.

Tab. 2: Ausscheidung von sechs hydrologischen Teilräumen im Untersuchungsgebiet Grindelwald nach charakteristischen Parametern. Die Abflussspenden wurden am 18.7.1977 ermittelt (vgl. Abb. 7).

hydrologische Teilräume	Flussdichte		Quellendichte		Abflussspende [l/s. km ²]	
	Länge [km]	[km/km ²]	Anzahl [n]	[n/km ²]		
Holzmaten	9.1 km ²	24.5	2.69	14	1.54	98
Nothalten	6.4 km ²	3.5	0.55	2	0.31	-
Grindel	24.7 km ²	73	2.95	10	0.40	18.5
Loichbiel	8.9 km ²	12.5	1.40	7	0.79	-
Wärgistal	21.51 km ²	48.5	2.25	12	0.56	105
Itramen	14.86 km ²	29	1.95	7	0.47	18.0

Die Karte des Gewässernetzes entspricht in der Feinheit der Aufnahme der Oberflächengewässer der Landeskarte 1:25'000. Damit wurde die **Flussdichte** ermittelt. In der Karte des Waldes wurde der geschlossene **Wald** ausgeschieden.

Der klassierten Permeabilität (gross-, mittel-, klein-, uneinheitlich) wurden klassierte hohe, mittlere und niedrige Waldbedeckungsanteile und klassierte kleine, mittlere und grosse Flusssichten zugeordnet. Damit konnten 12 Klassen Hydrotope (A 1,2,3,.....D 3) charakterisiert werden. Gesamthaft ergaben sich 32 Hydrotope, aufgeteilt in 8 Klassen, wobei allein 15 Hydrotope in der Klasse mit uneinheitlicher Permeabilität lagen (Tab. 2).

Durch das Uebereinanderlegen der drei Karten ergab sich eine grobe Hydrotopenabgrenzung. Anschliessend wurde die genaue Abgrenzung (Einzugsgebietsgrenzen) mittels topographischer Karte 1:25'000, Blatt 1229 Grindelwald vorgenommen (Abb. 3).

Bei groben Einzugsgebietsabgrenzungen lassen sich einigermaßen einheitliche Hydrotope ausscheiden. Bei der Feinabgrenzung lassen sich die Grenzen dann aber selten vollständig zur Deckung bringen. Es müssen somit Zugeständnisse in Form anderer Permeabilität und Waldbedeckung gemacht werden. Die vorwiegend horizontale geologische Abfolge ist mit der "vertikalen" Messung innerhalb der Hydrologie nur schwer vereinbar. Die extrem inhomogenen Verhältnisse (Geologie, Hangneigung, Vegetation, Nutzung u.a.) erschweren die Ausscheidung homogener hydrologischer Teilräume (Hydrotope) sehr.

Der Weg über die Hydrotope erwies sich nach intensiven Abklärungen denn auch als unmöglich, da Grindelwald von seinem geologisch-morphologischen Aufbau in seiner grossen Heterogenität dafür ein denkbar ungeeigneter Raum ist. Die nötige Homogenität der Hydrotope konnte nicht erreicht werden.

Selbst Kleinsthydrotope sind in diesem Raume zu inhomogen. Die Grenzen (Wasserscheiden) sind häufig nicht mit Sicherheit festlegbar, zum Teil können sie gar nicht bestimmt werden. Karsterscheinungen, viele kleine Rinnsale, Sümpfe, flächenhaft austretendes Wasser sind die Gründe dafür.

Auch die Ausscheidung von hydrologischen Teilräumen aufgrund des spezifischen Abflusses der Einzugsgebiete 2. Ordnung, erwies sich als ungeeignet. Die Abflussmessung an einem Stichtag (8.7.1977) an sämtlichen grösseren Seitenbächen beider Talseiten ergaben derart grosse Differenzen im spezifischen Abfluss der verschiedenen Einzugsgebiete, dass auch

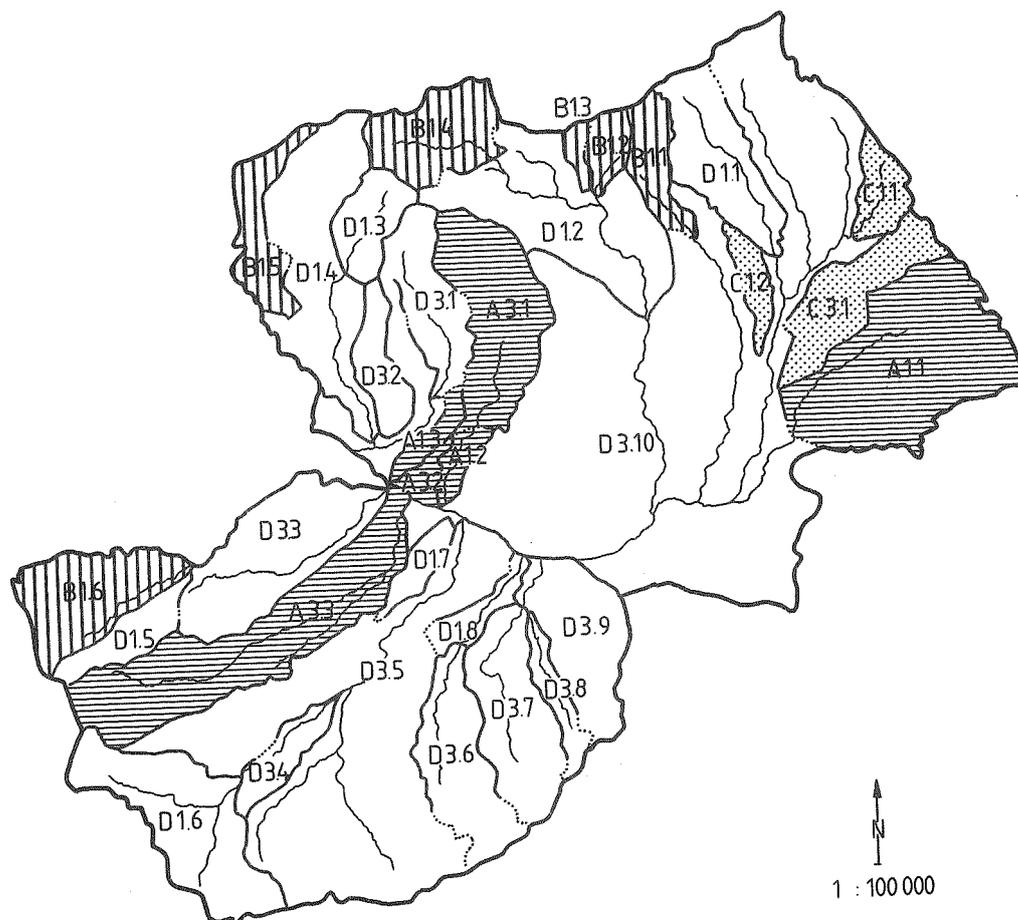


Abb. 3: Die Hydrotopen im Raume Grindelwald. Die zwölf Klassen (A1, 2, 3 D3) wurden nach den Ausscheidungskriterien Permeabilität, Waldbedeckung und Flussdichte ermittelt.

dieser Versuch abgebrochen werden musste. Es mussten andere Wege gesucht werden (vgl. Kap. 4). Zur Lösung von Fragen im Bereich des oberirdischen Abflusses wurden Teileinzugsgebiete ausgeschieden und zur Bearbeitung der Quelleinzugsgebiete wurde der Konvergenzmodell-Ansatz herangezogen.

3.3.3 Konvergenzansatz

Als Alternative zum skizzierten klassisch induktiven Vorgehen über Hydrotope oder Kleinst Einzugsgebiete kann der deduktive Konvergenzansatz gelten. Er hat seinen Namen von der bekannten Tatsache, dass der Abfluss (A_o und A_u) an einer Stelle, dem Einzugsgebiets-Durchbruch oder der Quelle konvergiert. In diesem Abfluss sind Informationen über die räumliche und zeitliche Verteilung des Wassers im Einzugsgebiet verschlüsselt gespeichert. Je besser dieser Abfluss nun nach seiner Zusammensetzung aufgespalten werden kann, desto sicherer kann auf Vorgänge im jeweiligen Einzugsgebiet bzw. im Speicher zurückgeschlossen werden.

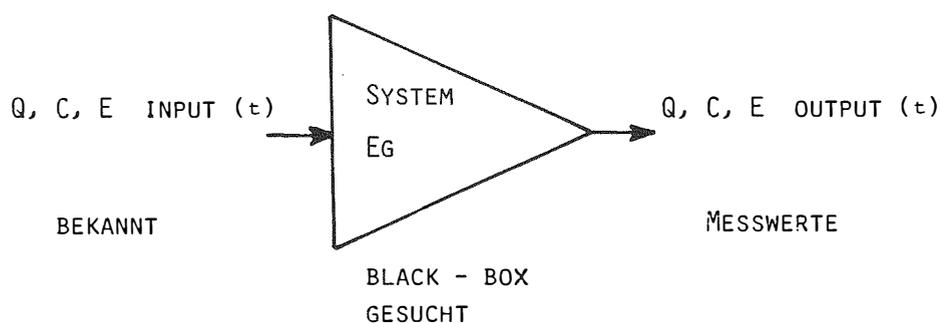


Abb. 4: Modellvorstellung zum "black-box-Ansatz" zur hydrologischen Untersuchung von Einzugsgebiets-Systemen. Q, C, E: Mengen, Konzentrationen, Energien.

Die einfachste Modellvorstellung geht auf den systemtheoretischen "black-box"-Ansatz zurück (Abb. 4). Die black-box (System Einzugsgebiet) kann im hydrologischen Sinne als Speicher aufgefasst werden. Dieser Ansatz kommt besonders in der Tracerhydrologie zur Anwendung (MUELLER et al. 1980; SIEGENTHALER et al. 1983; LEIBUNDGUT et al. 1981). Um eine flächendeckende Aussage machen zu können, geht es darum, die in den Abflusswerten gespeicherte Information aufzuschlüsseln und den Teilflächen im Einzugsgebiet zuzuordnen. Dazu

bedarf es somit auch der tieferen Kenntnis des Einzugsgebietes. Die wesentlichen Faktoren, die es zu kennen gilt, sind die Geofaktoren (stabile Einzugsgebietsfaktoren) und die Landnutzung.

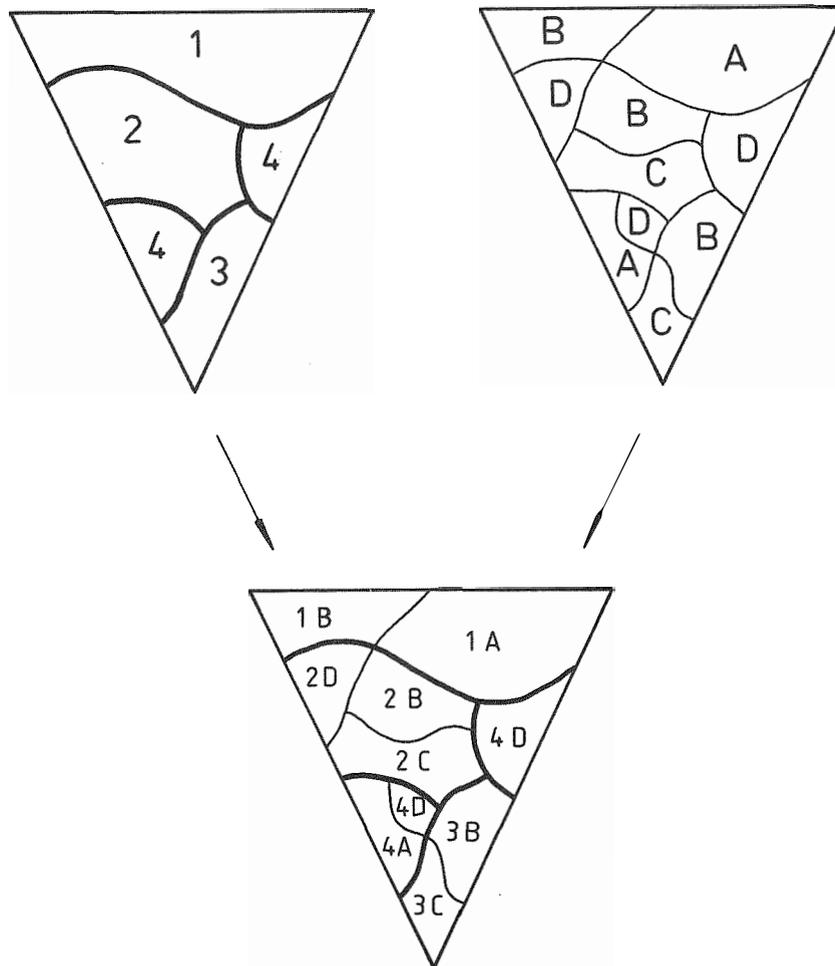


Abb. 5: Hydrologische Subsysteme ermittelt nach dem Konvergenzansatz. 1, 2, 3, 4: hydrologische Teilsysteme. A, B, C, D: Physiotope. 1A usw.: hydrologisch beschreibbare Subsysteme im Einzugsgebiet.

In einem ersten Teilschritt werden die hydrologischen Größen, deren Verlauf und Variabilität ermittelt. Die Entschlüsselung der im Abfluss gespeicherten Information nach Menge und physikalischen, chemischen und isotopischen Parametern erlaubt das Erkennen der Funktionsweise des Systems. Ueberdies kann bei genügender räumlicher Informationsdichte

das Gesamtsystem auch bereits in Teilsysteme mit unterschiedlichen hydrologischem Verhalten aufgegliedert werden (Abb. 5). Da heute über die einzelnen Speichersysteme teilweise bereits gute Kenntnisse vorhanden sind, wie beispielsweise den Karst- oder Porengrundwasser-Aquiferen, können bereits hier weitergehende Schlüsse im Sinne eines Funktionsmodelles des Einzugsgebietes gezogen werden. Der reine "black-box"-Ansatz kann somit etwas erweitert werden (Abb. 6).

In einem zweiten Teilschritt erfolgt die Erfassung der Einzugsgebiets-Ausstattung nach hydroökologischen Gesichtspunkten. Wir können auch davon ausgehen, dass heute der dafür zu erhebende Datensatz bekannt ist. Es sind dies einerseits die stabilen Einzugsgebietsfaktoren, d.h. Formparameter des Einzugsgebietes, Relief, Boden und Untergrund. Die wichtigsten Messgrößen sind Fläche, Höhenlage, Hangneigung und Durchlässigkeitsbeiwerte (WEINGARTNER 1980). Dazu sind die variablen Einzugsgebietsfaktoren zu erheben, was am besten über die Landnutzung erfolgt. Hier werden Kategorien ausgedehnt, die sich hydrologisch unterschiedlich verhalten, d.h. in denen zum Beispiel ein gleicher Niederschlag andersartig in die einzelnen Wasserhaushaltsglieder aufgelöst wird. Es sind Wald, Dauergrünland (ev. Trennung in Wiese und Weide), Ackerland, Siedlung und vegetationslose Flächen, Wasserflächen und Besonderheiten (z.B. Moore). Durch Ueber-einanderlegen der einzelnen Faktoren erfolgt eine Aus-scheidung von Physiotope, die das Einzugsgebiet gliedern.

Im dritten Teilschritt erfolgt die Zuordnung der Physiotope zu den hydrologischen Teilsystemen (vgl. Abb. 6). Durch räumliche Anpassung der Physiotope an die durch Modellvorstellungen gesicherten hydrologischen Teilsysteme können die so entstandenen Subsysteme im Einzugsgebiet weiter erhellt werden.

Ein vierter Teilschritt ist der Ueberprüfung der Ergebnisse (Modellkontrolle) reserviert. Als geeignete Methode bietet sich hier die Tracer-Markierungstechnik an.

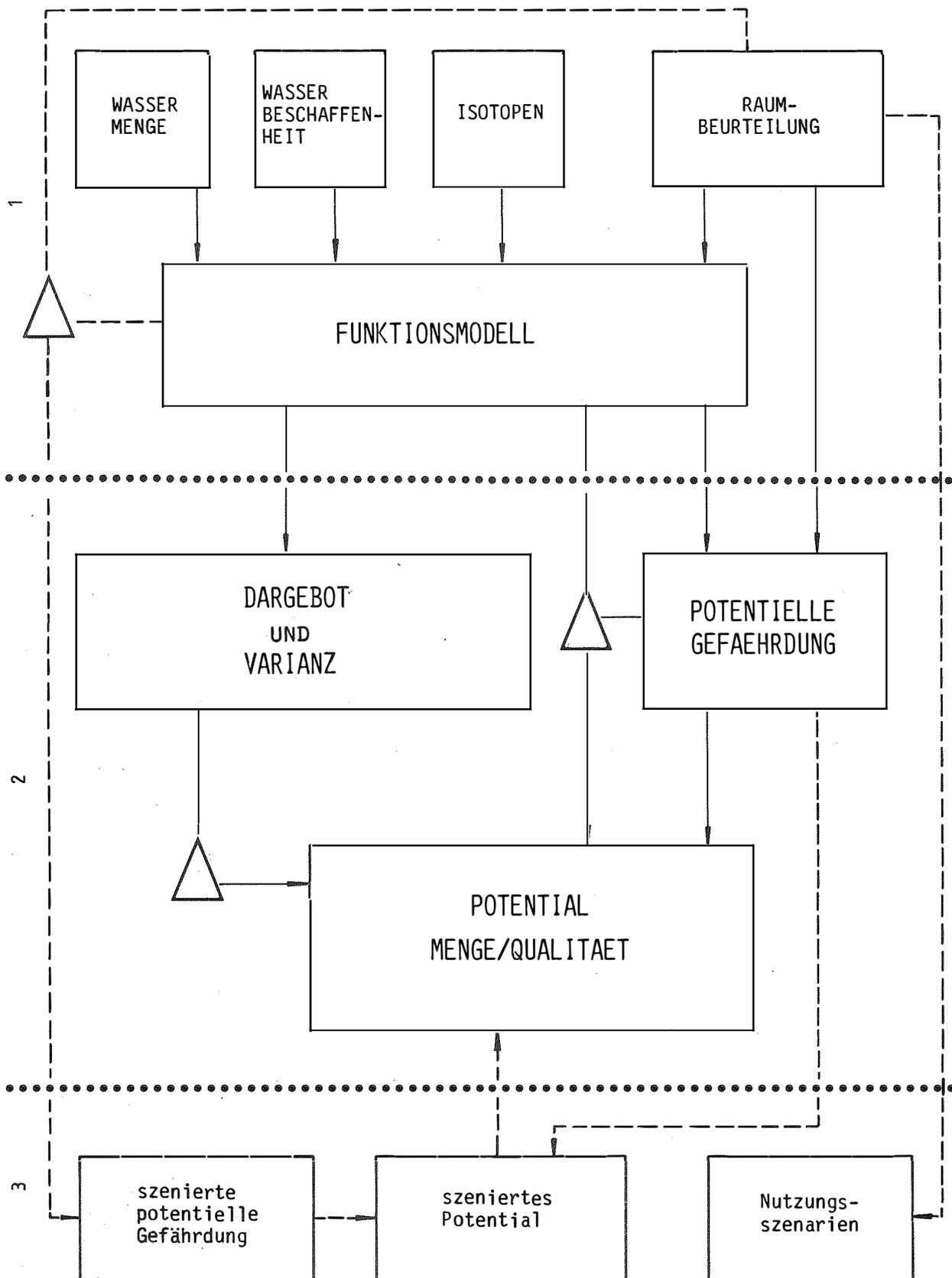


Abb. 6: Flussdiagramm zum Konvergenzansatz. Im ersten Teilschritt (1) wird das Funktionsmodell des untersuchten Hydrosystems ermittelt; in den Teilschritten 2 und 3 dessen Potential unter Berücksichtigung von Varianz und Persistenz, bzw. unter Annahme von Nutzungsszenarien.

Als Resultat wird ein Modell des Einzugsgebietes erhalten mit dem die gesuchten Grössen Potential, Varianz und Persistenz qualitativ beschrieben werden können. Die hydrologischen Daten sind quantitativ doch können die räumlichen Impulse (noch) nicht quantitativ eingegeben werden.

Die Lösung einer gestellten Aufgabe kann in der Anwendung allein des Konvergenzansatzes liegen. In diesem Falle wird ein Einzugsgebiet durch Messung der In- und Outputwerte untersucht. Die Aussagekraft des Resultates ist abhängig vom Informationsgehalt der Messwerte, der Grösse und der Homogenität des Untersuchungsgebietes. Bei umfassenderen Problemsstellungen wie im MAB-Grindelwald wird der Konvergenz-Ansatz vorzugsweise mit weiteren Verfahren, bzw. Ansätzen im Sinne eines Optimierungsverfahrens kombiniert. Im vorliegenden Falle erfolgte dies über die hydroökologische Arbeitsweise (vgl. Abb. 2).

4. VORERKUNDUNG UND KONZEPTBILDUNG

Die Umwelt setzt sich zusammen aus den biotischen und abiotischen Komponenten. Nach ökologischer Terminologie wird diese Umwelt als Oekosystem bezeichnet. Oekosysteme können sowohl aus einheitlichen Naturräumen (Wiesen, Wüsten, Mooren, Seen, Fließgewässern) als auch aus heterogen zusammengesetzten Räumen (Regionen) bestehen. Zu diesen letzteren gehört auch das hydrologische Einzugsgebiet.

Soweit es sich nicht um spezifisch gewässerkundliche Daten handelte, sollte die Vorerkundung gemäss Gesamtprojektplanung durch die jeweils zuständigen Fachbereiche durchgeführt werden. Allerdings zeigte sich hier eine Schwäche der interdisziplinären Arbeit. Die nötigen Grundlagen für das Teilprojekt Wasser standen in der Phase der Planung, dort nämlich wo sie gebraucht worden wären, nicht zur Verfügung. So mussten denn die Vorerkundungsdaten gleich wie bei einem Einzelprojekt, von der Arbeitsgruppe Wasser erhoben werden. Dies waren insbesondere die geologischen, hydrometeorologischen und orographischen Grundlagen, sowie die flächenhafte Erfassung der Landnutzungsarten.

Anstelle von Hydrotopen wurden **hydrologische Teilräume** (Gesamtfläche 85.5 km^2) nach den Kriterien Flussdichte und Quelldichte ausgedehnt. Die **Flussdichte** ist ein integraler landschaftsökologischer Faktor, der die physiographischen Verhältnisse des Einzugsgebietes widerspiegelt. Er ist insbesondere eine Funktion der Durchlässigkeit des Untergrundes, der Reliefverhältnisse (spez. der Hangneigung), der Vegetations - Landnutzungsverhältnisse und der Niederschlagsverhältnisse. Die Berechnung stützt sich auf die Flussnetzkarte 1:25'000. Die Gesamtlänge des Flussnetzes beträgt 191 km. Die mittlere Flussdichte liegt bei 2.23 km/km^2 , und ist damit recht hoch. Auffallend sind aber die Extremwerte von 0.55 km/km^2 und 2.95 km/km^2 . Die Flussdichte

bestätigt damit die bekannte grosse Heterogenität der Raum-
ausstattung im Untersuchungsgebiet (vgl. Tab. 2).

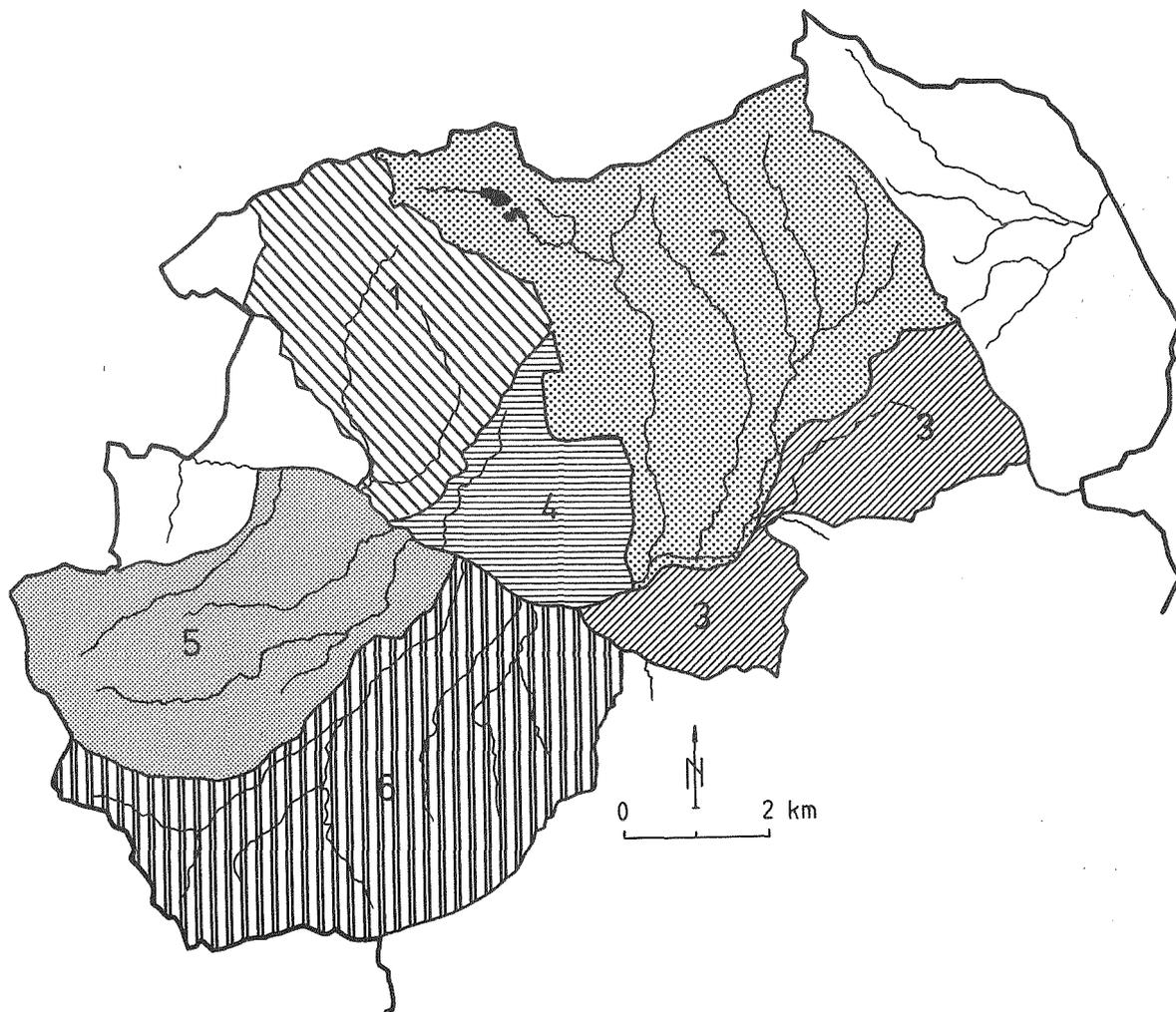


Abb. 7: Hydrologische Teilräume im Untersuchungsgebiet Grindelwald auf-
grund der Kriterien Fluss- und Quellendichte (vgl. Tab. 2).

Die **Quellendichte** wurde als Gegenstück zur **Flussdichte** als Ausdruck der vorhandenen Wasserressourcen erhoben. In der Vorerkundungsphase konnten 52 Quellen erfasst werden. Daraus resultierte eine mittlere Quellendichte von rund 0.6 Quellen pro Quadratkilometer. Nach der Detailaufnahme der Quellen erhöhte sich dieser Wert allerdings auf rund 1.5 pro km². Die räumliche Verteilung der Quellendichte wurde aber nicht wesentlich verändert.

In vier Teilräumen konnten auch die **Abflussspenden** in einer zeitlichen Stichprobe erhoben werden. Die Differenzen sind ausserordentlich hoch und zeigen die Notwendigkeit der Aufgliederung des Gesamttraumes in Teilräume. Die Werte der Tabelle 2 sind in der Abbildung 7 räumlich zusammengefasst als "Hydrologische Teilräume" (Anzahl 6) ausgeschieden.

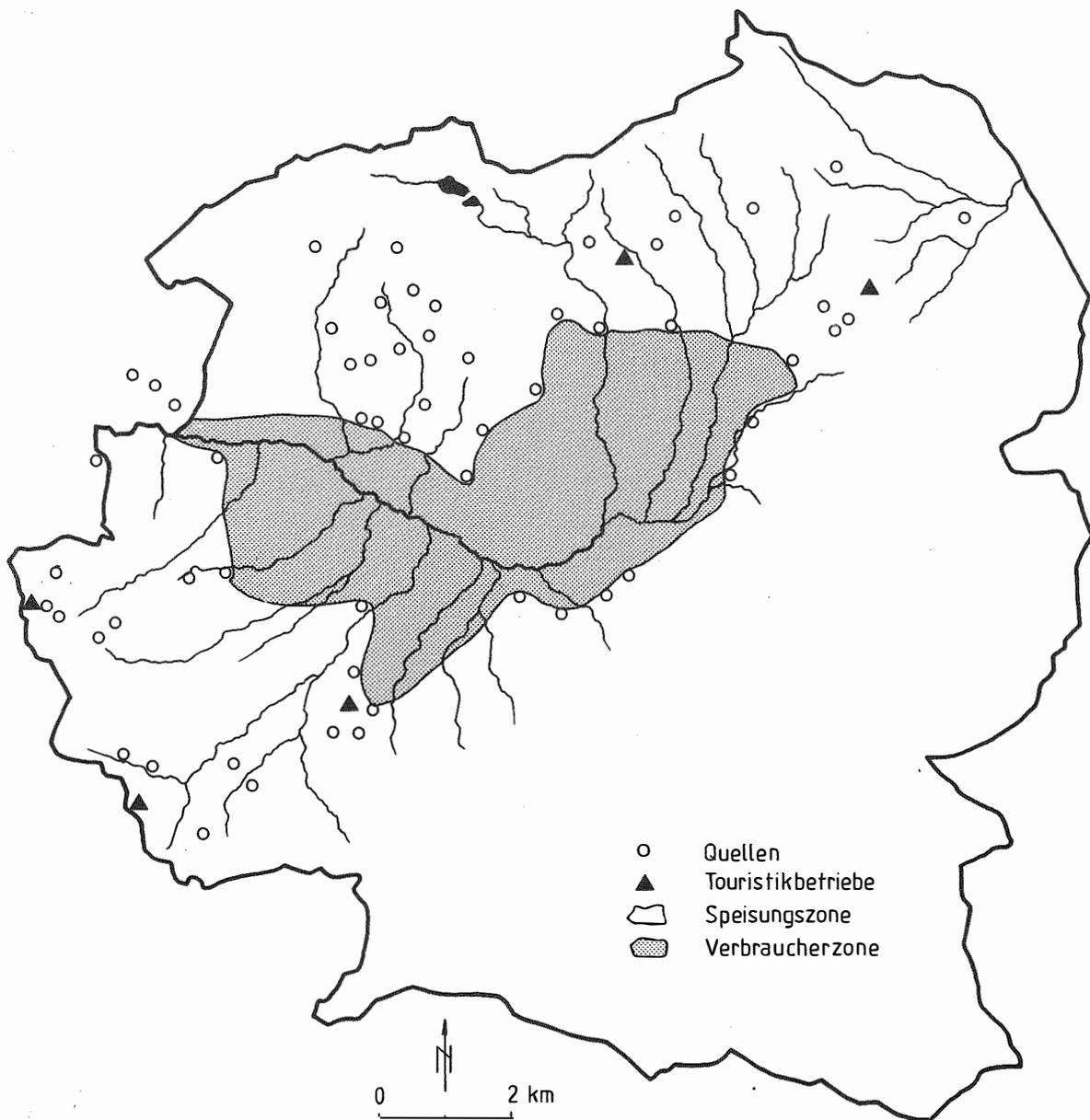


Abb. 8: Hydrologische Gliederung des Untersuchungsraumes Grindelwald in eine Speisungs- und eine Verbraucherzone. Die wenigen Quellen in der Verbraucherzone sind nicht eingezeichnet.

Im Sinne einer Arbeitshypothese gemäss der Projekt-Fragestellung wurde zudem zwischen einer **Speisungs-** und einer **Verbraucherzone** unterschieden (Abb. 8). Die Forderung nach Erhaltung des ökologischen Gleichgewichtes wird dabei nur für die Speisungszone gestellt. Die überwiegende Anzahl der Quellen liegt in der Speisungszone.

Hydrologische Daten waren im Untersuchungsgebiet nur beschränkt vorhanden. Mit Hilfe der in der Vorerkundung gewonnenen Erkenntnisse konnte ein **hypothetisches hydrologisches Wasserhaushaltsmodell** entworfen werden, welches als hydrologische Hauptelemente den oberirdischen Abfluss und den Quellabfluss enthielt. Darin wurde auch ein Fremdwasserzufluss postuliert.

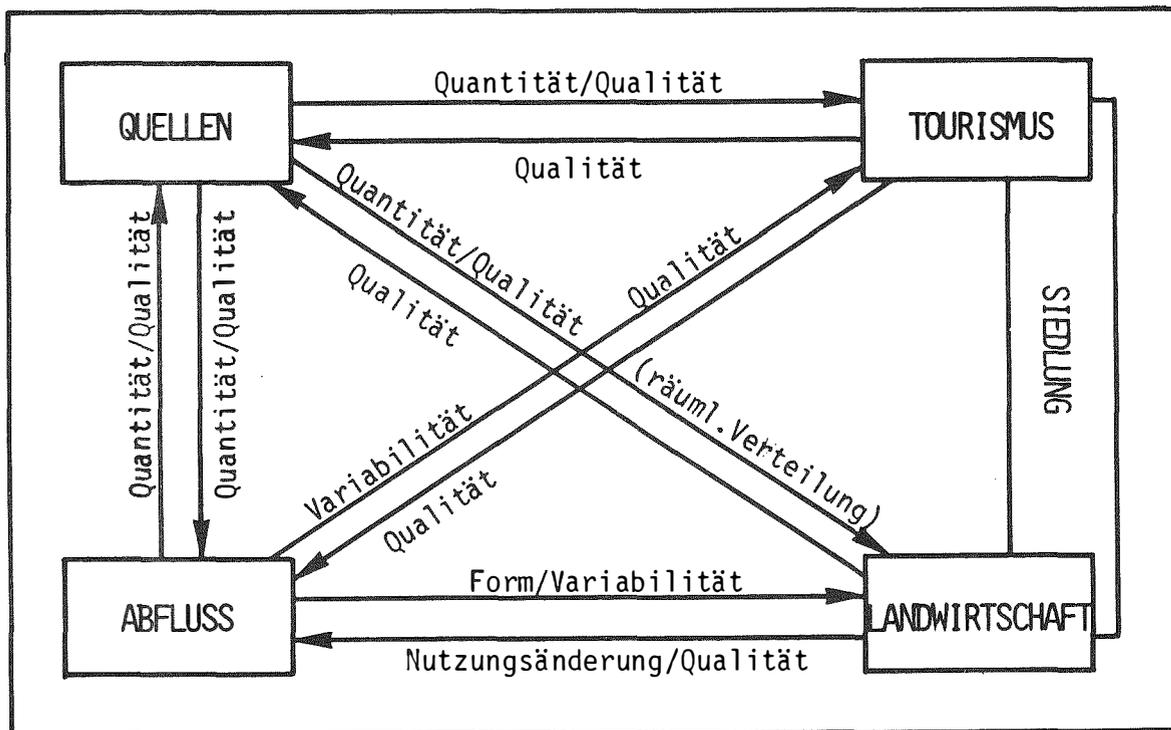


Abb. 9: Hypothetisches Modell zu den hydroökologischen Untersuchungen mit den hydrologischen Hauptelementen Quellen und Abfluss und den sozioökonomischen Bereichen Landwirtschaft und Tourismus.

Die Abbildung 9 zeigt schematisch die Beziehungen zwischen den hydrologischen Hauptelementen und den Geofaktoren, der Berglandwirtschaft, dem Tourismus und der Siedlung.

Gemäss dem Ablaufschema für hydroökologische Untersuchungen (vgl. Abb. 2) mussten in der Datenerfassungsphase folgende wichtigste Arbeitsschritte durchgeführt werden:

1. Die Ermittlung des Wasserhaushaltes für das Einzugsgebiet Grindelwald.
2. Die Analyse der Hauptelemente in quantitativer und qualitativer Hinsicht in einem für die Fragestellung genügendem räumlich-zeitlichen Detaillierungsgrad unter Anwendung des Konvergenz-Ansatzes.

Auf dem Hintergrund der konzeptionellen Ueberlegungen konnte das **Messnetz** zur hydrologischen Datenerfassung aufgestellt werden (Abb. 10). Gesamthaft wurden 48 Messstellen zur Erfassung des Niederschlages, des oberirdischen Abflusses und der Quellschüttungen errichtet. Die Messintervalle reichten von der kontinuierlichen Aufzeichnung bis zu mehreren Monaten (kleinere Quellen). Die nicht während der ganzen Untersuchungsperiode benützten Messstellen der Detailstudien, wie beispielsweise die Abflussstationen an den Seitenbächen, sind nicht aufgeführt. Für Errichtung und Betrieb dieses Messnetzes im alpinen Raum und im Gebirgswinter waren ausserordentliche Schwierigkeiten zu meistern. Dank Einsatz, guter Zusammenarbeit mit Behörden und Amtsstellen und der Verwendung geeigneter Apparaturen und Messtechniken konnte die nötige Datengrundlage beschafft werden.

Um die räumliche Verteilung des Niederschlags im Untersuchungsgebiet zu erfassen, sind die von der SMA betriebenen Messstellen Grindelwald-Dorf und Kleine Scheidegg nicht ausreichend. Deshalb wurde ein erweitertes **Niederschlagsmessnetz** eingerichtet, das von Sommer 1979 bis September 1981 in Betrieb war. Es bestand aus 26 Geräten an 14 Stationen.

Das **Abflussmessnetz** war zwischen Sommer 1979 und Herbst 1981 in Betrieb und umfasste die zwei Messstellen beim Ausfluss der beiden Grindelwaldgletscher zur Messung des oberirdischen Inputs ins Untersuchungsgebiet, die Messstelle an der

Lütschine in der Schwendi und jene am Schwendibach zur Messung des Outputs. Mit diesen Stationswerten konnte der Abfluss aus dem hydrologischen Untersuchungsgebiet ermittelt werden.

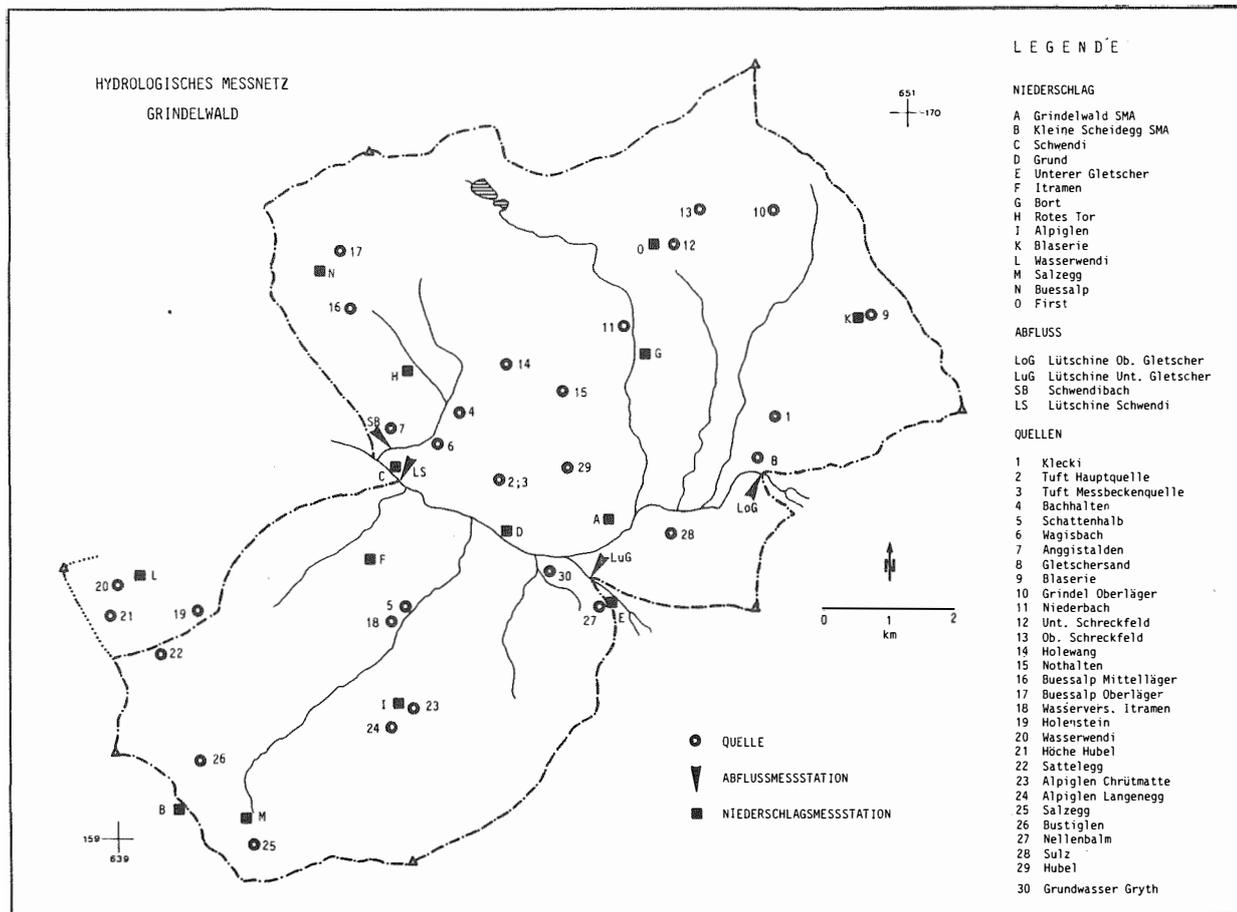


Abb. 10: Hydrologisches Messnetz im Untersuchungsgebiet Grindelwald.

Im Untersuchungsgebiet Grindelwald befinden sich weit über hundert grössere und kleinere, meist gefasste **Quellen**. Im Rahmen der MAB-Untersuchungen konnten nur eine beschränkte Anzahl davon näher untersucht werden. Die **monatlichen Untersuchungen** von sieben im Sinne der Potentialität wichtigen und repräsentativen Quellen gaben Aufschluss über die Wasserbeschaffenheit und ihre jährliche Schwankung. Gleichzei-

tig ist das Grundwasser bei der Pumpstation Gryth und das Wasser der Lüttschine am Oberen und Unteren Gletscher und beim Talausfluss in der Schwendi analysiert worden. Es sind folgende physikalische und chemische Eigenschaften untersucht worden:

- Schüttung/Abflussmenge
- Temperatur des Wassers
- el. Leitfähigkeit
- Oxidierbarkeit (nur zeitweise)
- pH-Wert (nur zeitweise)
- Ionengehalt: Ca^+ , Mg^+ , K^+ , Na^+ , Fe^{+3} , NH^{4+} ,
 HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^- , PO_4^- tot.
(z.T.durch Chemisches Institut Universität Bern)
- Trübung, SiO_2 -Gehalt (Chemisches Institut Universität Bern)
- Isotopische Zusammensetzung: ^3H , ^{18}O -18 (durch Physikalisches Institut der Universität Bern, Abt. LLC).

Nebst den monatlichen Beprobungen wurden im Herbst 1979 und in den Sommern 1980 und 1981 28 ausgewählte Quellen detailliert untersucht, um die **räumliche Verteilung der Quelleigenschaften** zu erfassen. Gleichzeitig wurden bakteriologische Proben gezogen, wie sie auch etwa monatlich durch die Gemeinde Grindelwald an den für die Versorgung wichtigen Quellen erhoben und vom Kantonalen Labor auf Bakteriengehalt analysiert werden. Während diesen Kampagnen wurden auch von allen im Untersuchungsgebiet in die Lüttschine mündenden Bächen der Abfluss punktuell gemessen und zur physikalisch-chemischen Untersuchung Proben entnommen.

Nicht in einem Messnetzplan darstellbar sind die tausenden von Stunden an Feldbegehungen der Projektmitarbeiter zur Erhebung der Messwerte, verbunden mit der Aufnahme der Gebietscharakteristika. Erst damit konnten die zur Interpretation der Daten unerlässlichen Informationen gewonnen werden.

5. WASSERHAUSHALT

Aus methodischer Sicht ist zu beachten, dass die Erfassung des Wasserhaushaltes mit klassisch-hydrologischen Methoden erfolgte. Die Auswahl der Messparameter und die Anlage des Messnetzes richtete sich selbstverständlich nach den Zielen des Gesamtprojektes. Die Datenerhebung weicht deshalb teilweise von der in einer reinen hydrologischen Wasserhaushaltsuntersuchung ab.

Die Erfassung des Wasserhaushaltes wurde als Dissertationsthema formuliert und konzipiert (LEIBUNDGUT 1978b). Die nachstehende Darstellung des Wasserhaushaltes stützen sich im wesentlichen auf die von FELBER durchgeführten Feldarbeiten und die ermittelten Daten.

5.1 Niederschlag

Die räumliche Verteilung der korrigierten und auf langjährige Mittelwerte umgerechneten Niederschläge wird in der Isohyetenkarte Abbildung 11 vorgestellt. Auffallend macht sich der Steilabfall der Hochalpen bemerkbar, wo durch das Abregnen der niederschlagsträchtigen Westwinde eine starke Zunahme der Niederschläge mit der Höhe festzustellen ist. Da in den Gipfelregionen keine Niederschlagsmesser aufgestellt waren, ihre Messdaten wären auch kaum aussagekräftig, haben die Isohyeten hier eher postulierenden Charakter. Weitere niederschlagsreiche Gebiete sind die Höhenzüge Faulhorn bis Schwarzhorn und die Südflanke des Rötihorns (vgl. Abb. 1). Der Talkessel selbst ist relativ trocken. Diese Lage wirkt sich auch auf der südlichen Talseite (Itramen) aus.

Die Alp Wasserwendi (ausserhalb des hydrologischen Bilanzierungsgebietes) dürfte sogar ein relatives Minimum aufweisen. Die Buessalp wird durch die Kulisse von Burg und Winteregg, das Gebiet der Bachalpseen durch Rötihorn und Faulhorn gegen die niederschlagbringenden Westwinde abgeschirmt. In der Achse der Scheidegg-Passübergänge ist die Zunahme des Niederschlages mit der Höhe relativ gering.

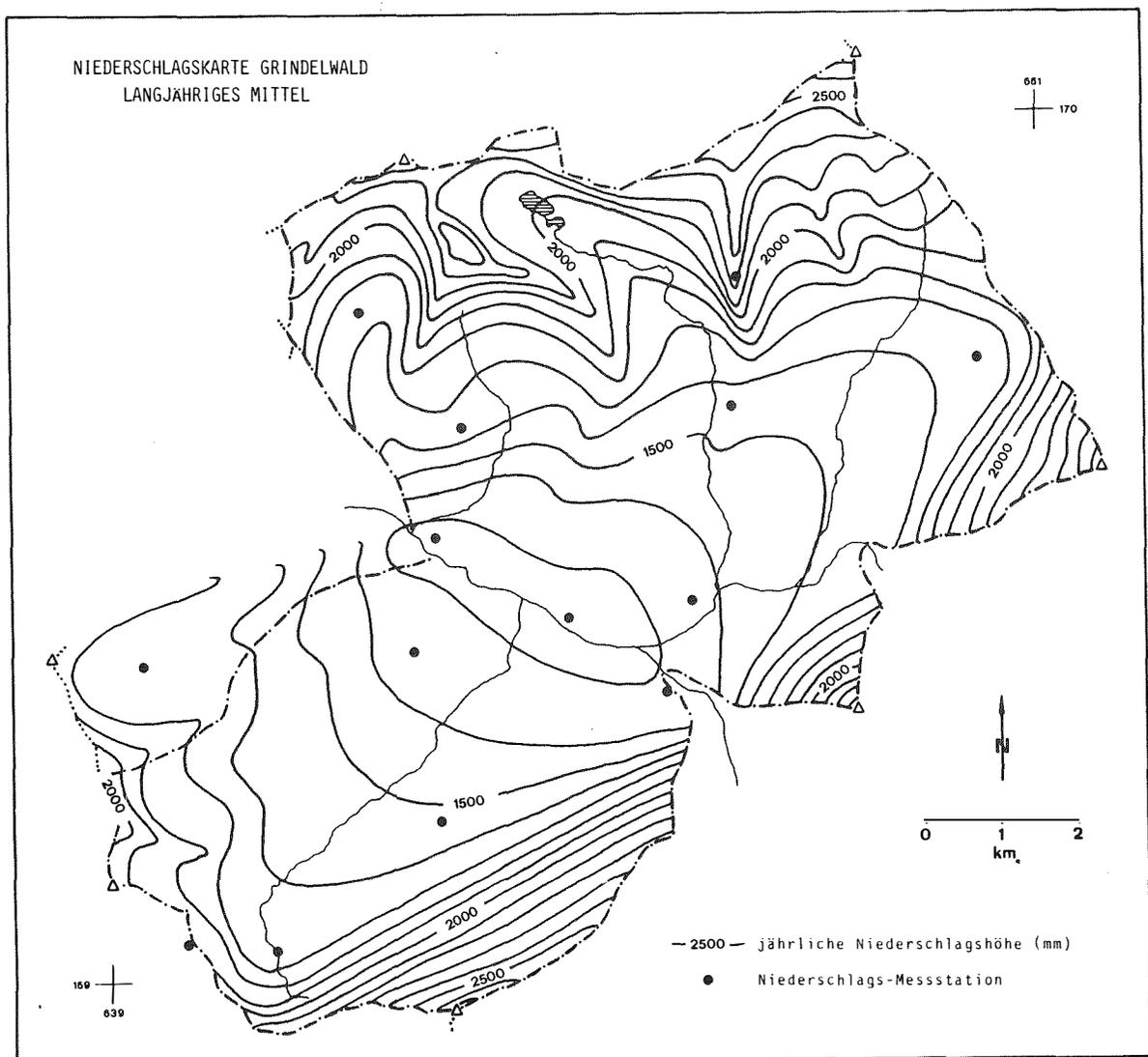


Abb. 11: Karte des langjährigen mittleren Niederschlages im Untersuchungsgebiet Grindelwald. Die räumliche Verteilung basiert auf der Messperiode 1979-81.

Die Niederschlagskarten der Einzeljahre 1980 und 1981 (FELBER, 1982) zeigen, dass dieses Grundmuster auch für Einzeljahre noch gilt. Bei grösserer zeitlicher Auflösung hingegen kann diese Verteilung stark ändern (ASCHWANDEN 1982). Die mittlere Zunahme des Niederschlages pro 100 m Meereshöhe beträgt 52 mm.

Tab. 3: Unkorrigierte monatliche Niederschläge in Grindelwald-SMA in der Periode 1901-1960 (100%) und während der Untersuchungsperiode. Quelle: Beihefte (1965: E/151), Messdaten SMA.

	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Jahr
1901 - 60 [mm]	101	87	85	84	71	79	101	118	144	149	138	107	1264
1980 [mm]	165	194	165	98	99	124	87	98	190	182	87	71	1560
1980 [%]	163	223	194	117	139	157	86	83	132	122	63	66	123
1981 [mm]	212	81	121	206	46	207	37	152	125	246	158	206	1798
1981 [%]	210	93	143	245	65	262	37	128	87	165	115	192	142

Die Tabelle 3 gibt einen Einblick in die **zeitliche Verteilung der Niederschläge** in der Auflösung von Monatswerten. Sie zeigt auch die überdurchschnittlich hohen Niederschläge der Untersuchungsjahre 1980 und 1981. Die Abweichungen der mittleren Monatsniederschläge vom langjährigen Mittel sind nicht gleichförmig verteilt. Der Anteil des Sommerniederschlages im langjährigen Mittel beträgt 60%. Im Jahre 1980 betrug das Verhältnis von Sommer- zu Winterniederschlag 46:54%, 1981 49:51%. In der Untersuchungsperiode fielen somit die Sommerniederschläge unterdurchschnittlich gering aus.

Durch die **Korrektur** der gemessenen Niederschlagswerte nach der Methode von SEVRUK (1981) konnten die systematischen Messfehler eliminiert werden. Die Winterwerte wurden aus Stützpunktmessungen der Schneedecke und über eine multiple lineare Regression der ganzjährig betriebenen SMA-Stationen berechnet.

Im Sinne von Stützpunktmessungen wurden Schneemessungen durchgeführt. Die Berechnung des jährlichen Gebietsniederschlages kann als recht genau angesehen werden. Die Abweichung gegenüber dem wahren Gebietsniederschlag sollte $\pm 5\%$ nicht übersteigen (vgl. Kap. 3.2). Diese optimistisch erscheinende Beurteilung beruht auf der geschilderten sorgfältigen Datenaufnahme und Datenbehandlung.

5.2 Verdunstung

In den Untersuchungen in Grindelwald wurde die **Verdunstung als unabhängige Grösse** bestimmt um anhand der Wasserbilanzgleichung die Frage nach der Geschlossenheit des Einzugsgebietes beantworten zu können. Es kam nur ein Verfahren in Frage, dass die Verdunstung aus den im Untersuchungsraum zur Verfügung stehenden meteorologischen Daten zu berechnen erlaubte.

Zur Ermittlung der **jährlichen Gebietsverdunstung** von Grindelwald wurde deshalb die Formel von PENMAN (LANG 1978:24) herangezogen. Darin werden die auf der Oberfläche einstrahlenden, bzw. ausstrahlenden Wärmeströme gemessen und mit einem aerodynamischen Ansatz kombiniert. Damit kann mit verfügbaren Daten des meteorologischen Messnetzes der SMA die potentielle Evaporation (EP) einer freien Wasserfläche ermittelt werden. Zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration einer Pflanzendecke muss der EP-Wert nach PENMAN (1956:22) mit einem jahreszeitenabhängigen Faktor von 0,6 bis 0,8 multipliziert werden.

Die **Verdunstung der Schneedecke** wurde speziell berechnet: Für hochwinterliche Verhältnisse wurde in Anlehnung an DE QUERVAIN und ZINGG (1951) ein Wert von 0,14 mm pro Tag eingesetzt. Für die zwei letzten Monate vor der Ausaperung und den Monat nach dem Einschneien wurde eine Nass-Schneedecke mit einem Verdunstungswert von 0,6 mm pro Tag angenommen (MARTINEC 1974, in FOEHN 1978:37). Da Fels und Geröllgebiete ebenfalls bedeutend weniger verdunsten als vegetationsbedeckte Flächen, wurden sie hier wie schneebedeckte Flächen behandelt.

Als Grundlage der **flächenhaften Berechnung** diente ein **500m-Raster**, der über das Untersuchungsgebiet gelegt wurde. Von den Rasterflächen wurden jene ausgeschieden, die ganzjährig mit Schnee und Eis bedeckt sind sowie jene mit Fels- und

Gerölluntergrund. In Abbildung 12 ist die langjährige Verdunstung ebener Flächen auf der Grundlage des 500m-Rasters in Klassen von 50 mm Verdunstungshöhe dargestellt.

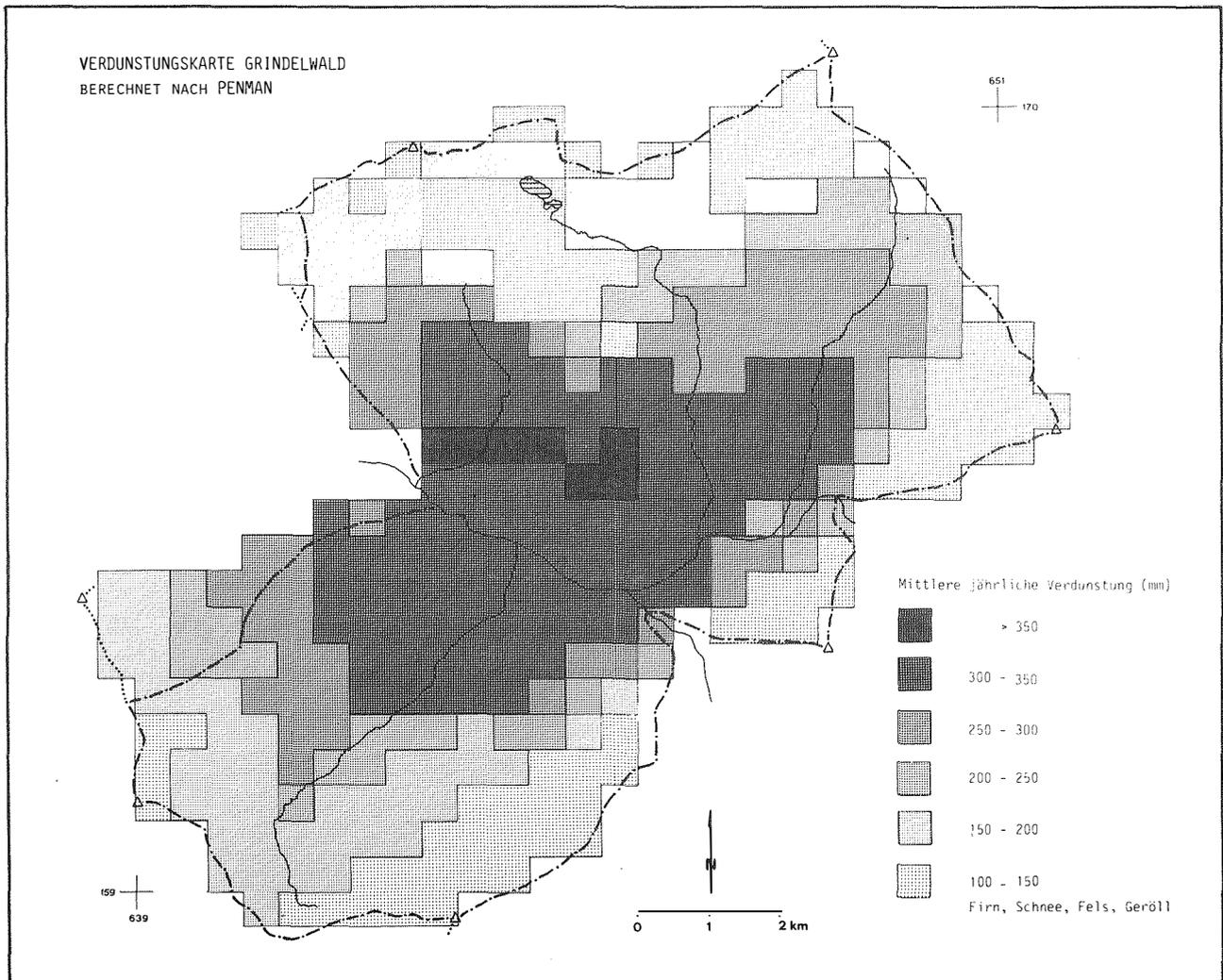


Abb. 12: Die mittlere jährliche Verdunstung im Untersuchungsgebiet Grindelwald. Es ist die berechnete Verdunstung ebener Flächen dargestellt.

Die Summe von Schnee- und Vegetationsverdunstung ergibt die potentielle Evapotranspiration horizontaler Flächen für jede berechnete Geländeeinheit. Die Exposition wird bei der Berechnung der Verdunstung nach PENMAN nicht berücksichtigt.

Die dadurch bedingten Verschiebungen zwischen Nord- und Südlagen gleichen sich jedoch bei der Mittelbildung im kesselförmigen Untersuchungsgebiet etwa aus. Dank dem grossen Wasserdargebot im Untersuchungsgebiet darf die Annahme getroffen werden, dass die aktuelle Evapotranspiration der potentiellen entspricht.

Für das Untersuchungsgebiet Grindelwald ergaben sich für die beiden Jahre 1980 und 1981 Verdunstungshöhen von 221,7 mm und 223,5 mm. Nach WITTERUNGSBERICHTEN der SMA wiesen beide Untersuchungsjahre leicht defizitäre Sonnenscheindauer auf. Aus diesem Grund wird die **langjährige Evapotranspiration** auf 230 mm Verdunstungshöhe aufgerundet.

Die meisten der in die PENMAN-Formel einzusetzenden Parameter haben aus den meteorologischen Daten der beiden SMA-Klimastationen Grindelwald und Jungfrauoch interpoliert werden müssen. Anhand einer Teilfläche in repräsentativer Höhenlage des Talkessels wurde für einen durchschnittlichen Monat die mögliche Schwankungsbreite der berechneten Verdunstung abgeschätzt, indem alle einzusetzenden meteorologischen Parameter um einen angenommenen maximalen Fehler variiert wurden. Es zeigte sich dabei, dass der maximale Fehler auf den Verdunstungswert eines Monats rund 20 % ausmachen kann. Im Mittel über das Jahr heben sich die Fehler bei der Summierung gegenseitig mindestens zum Teil auf. Für die Beurteilung der Jahresverdunstung wird gleichwohl mit einem Unsicherheitsintervall von maximal $\pm 20\%$ gerechnet.

5.3 Oberirdischer Abfluss

Das Abflussverhalten der Lüttschine in der Schwendi spiegelt das hygrische Geschehen im gesamten Einzugsgebiet wider. Die **starken Schwankungen des Abflusses** sind typisch für einen Gebirgsfluss mit grossem Gletscheranteil. Sie können in periodische und unperiodische Schwankungen unterteilt werden. Die periodische Jahresschwankung ist eine Folge der winterlichen Speicherung der Niederschläge in Form von Schnee und dessen Abschmelzungen in den Frühlings- und Sommermonaten. Die Abflussmengen der Sommermonate werden durch Gletscherschmelze verstärkt. Die Differenz zwischen dem minimalen mittleren Monatsabfluss im Januar und dem maximalen mittleren Monatsabfluss im August beträgt rund $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Winter werden die Abflüsse fast ausschliesslich von Grund- und Quellwasser gespeist. Nur ausserordentliche Regenfälle oder Schneeschmelze vermögen die Abflussganglinie für einige Zeit anzuheben. Mit der Schneeschmelze im Frühling setzt die Tagesschwankung ($7 \text{ m}^3/\text{s}$ im Sommer) des Abflusses ein.

Der oberirdische Abfluss aus dem hydrologischen Untersuchungsgebiet wird aus der Differenz der Summe der Abflüsse beim Talausgang und der Summe der Gletscherabflüsse erhalten ($A_o = LS + SB - LoG - LuG$).

Für die beiden Untersuchungsjahre 1980 und 1981 ergeben sich als **mittlere Jahresabflussmengen** $4,30$ respektive $4,85 \text{ m}^3/\text{s}$ entsprechend $52,8$ und $59,5 \text{ l/skm}^2$. Die Abflussspenden liegen damit zwar sehr hoch, aber doch im Bereich der von BINGGELI (1974) ausgewiesenen Werte für die obersten Abschnitte der Lüttschinen und Kandertäler (Tab. 4).

Der Anteil der Gletschereinzugsgebiete (LoG und LuG) am Gesamtabfluss bei Lüttschine-Schwendi beträgt 48% im Jahre 1981 und 51% im Jahre 1982. Der Anteil ist somit recht konstant.

Im Jahresgang überwiegen nur in den Monaten Juni bis Oktober die mittleren Abflussmengen aus den Gletschereinzugsgebieten gegenüber jenen aus dem Untersuchungsgebiet. Dies aber nicht vollständig jedes Jahr (Abb. 13). Daraus ist zu entnehmen, dass das an der Abflussstation Lüttschine-Schwendi gemessene Abflussregime nur für das Gesamteinzugsgebiet inklusive der Gletscher gilt. Die Gletscherabflüsse weisen a-glaziales Abflussregime auf, der Abfluss aus dem Untersuchungsgebiet ein nivales, während der Gesamtabfluss ein b-glaziales Regime zeigt. Eine weitergehende Diskussion der zeitlichen Variabilität erfolgt im Kapitel 7.

Tab. 4: Mittlere monatliche Abflussmengen und Jahresmittel 1980/1981 der Stationen Lüttschine-Oberer Gletscher (LoG), Lüttschine-Unterer Gletscher (LuG), Lüttschine-Schwendi (LS) und Schwendibach (SB) und des hydrologischen Einzugsgebietes (Ao).

m ³ /s	hydrologisches Jahr 1980												Jahr
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	
LoG	1.20	0.32	0.23	0.04	0.06	0.06	0.21	0.86	2.09	2.94	6.03	3.08	1.43
LuG	2.10	0.87	0.60	0.12	0.15	0.17	0.43	1.30	4.30	5.91	8.36	6.03	2.53
LS	6.49	3.94	2.57	1.06	1.83	1.61	3.05	6.91	16.43	16.84	21.01	11.24	7.75
SB	0.28	0.39	0.30	0.12	0.23	0.19	0.33	0.77	1.36	1.18	0.70	0.21	0.50
Untersuchungs- gebiet	3.47	3.13	2.04	1.02	1.84	1.57	2.74	5.52	11.40	9.17	7.32	2.34	4.30
m ³ /s	hydrologisches Jahr 1981												Jahr
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	
LoG	0.82	0.23	0.09	0.05	0.03	0.26	0.71	1.04	4.11	4.92	5.81	4.58	1.89
LuG	1.96	0.70	0.24	0.17	0.13	0.63	2.19	2.37	6.98	6.33	8.85	7.32	3.16
LS	5.09	2.54	1.44	1.29	0.97	4.68	11.64	10.33	18.68	19.91	19.40	16.86	9.40
SB	0.24	0.23	0.12	0.10	0.08	0.47	1.13	0.77	0.98	0.90	0.47	0.40	0.49
Untersuchungs- gebiet	2.55	1.83	1.23	1.18	0.89	4.25	9.87	7.70	8.57	9.56	5.21	5.37	4,85

Die mehrfache kampagnenhafte Messung der Abflussmengen aller in die Lüttschine mündenden Seitenbäche erlaubt es, anhand der spezifischen Abflüsse die Teileinzugsgebiete zu vergleichen (Tab. 5).

Die Abflussspenden in den Einzugsgebieten der Seitenbäche liegen im Sommer/Herbst zwischen 2,9 l/skm² (Sandbach) und 163,2 l/skm² (Allouwinenbach). Das Minimum wurde im Oktober, das Maximum im Juli gemessen. Die Fläche der erfassten Seitenbach-Einzugsgebiete beträgt 59,2 km² oder 82% der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes.

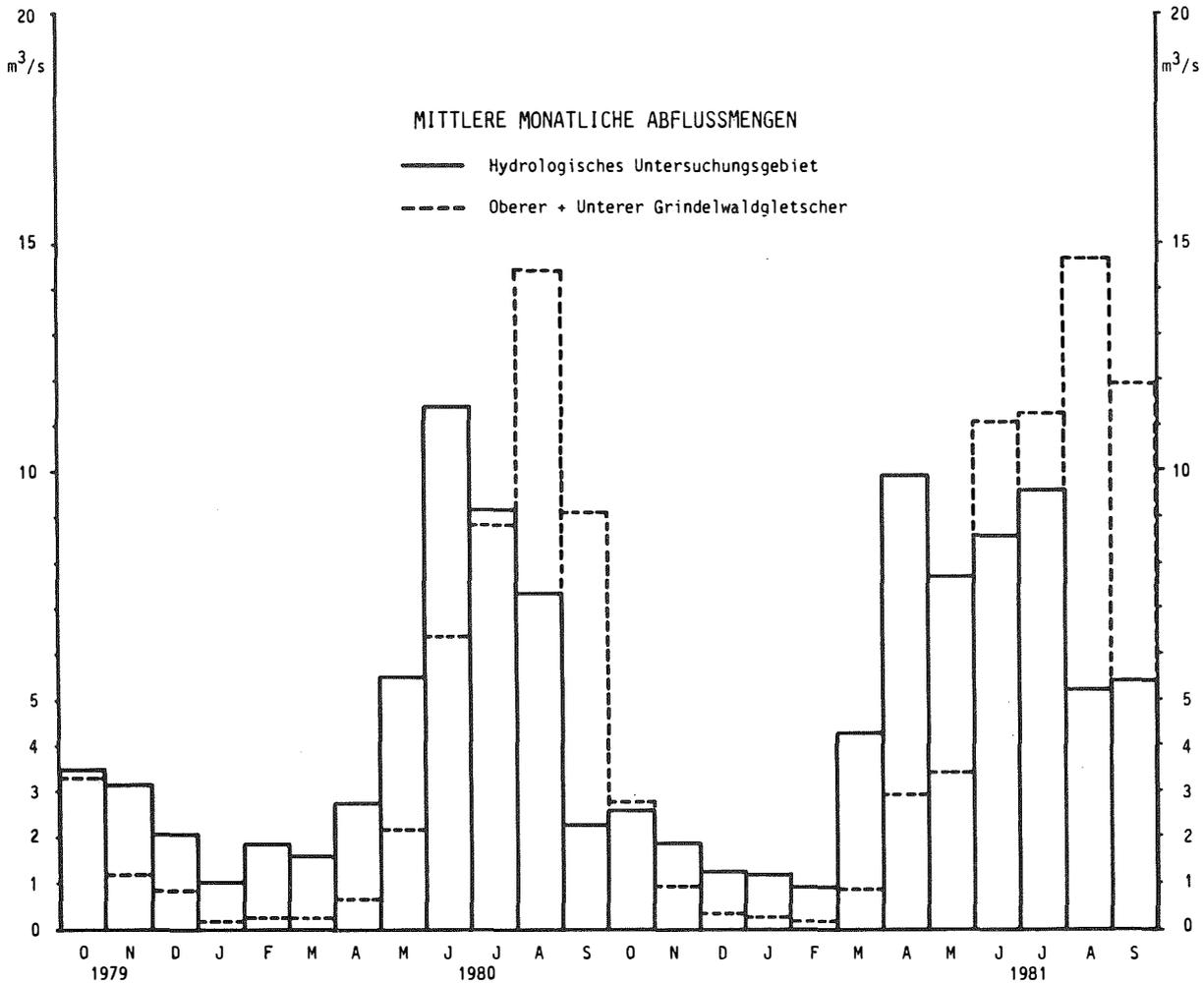


Abb. 13: Vergleichende Darstellung der mittleren monatlichen Abflüsse aus dem hydrologischen Untersuchungsgebiet und den beiden Gletscher-Einzugsgebieten.

Der Mittelwert der gemessenen **spezifischen Abflüsse** aus den **Seitenbächen** beträgt am 18.10.1979 48,4 l/skm² und für den 17.7.1980 110,5 l/skm². Beide Werte liegen rund um den Faktor 2 unter den Abflussspenden aus dem Gesamtgebiet. Die

entsprechenden Mittelwerte der Stichtage 15.7.1981 und 20.8.1981 liegen bei 72,2 l/skm² und 30,1 l/skm². Die Werte liegen je etwa um den Faktor 4 unter denjenigen des Gesamteinzugsgebietes. Darin zeigt sich wiederum die Verschiedenartigkeit der beiden Untersuchungsjahre mit dem relativ grossen Abflussanteil aus dem Untersuchungsgebiet in der ersten Hälfte. Die Abflussspenden der Gletschereinzugsgebiete ordnen sich in dieses Bild ein.

Tab. 5: Abflussmengen und Abflussspenden der Fliessgewässer im Untersuchungsgebiet Grindelwald. * inkl. turbinirtes Wasser.

	Fläche km ²	18. 10. 79		17. 7. 80		25. 2. 81		15. 7. 81		20. 8. 81	
		l/s	l/skm ²	l/s	l/skm ²	l/s	l/skm ²	l/s	l/skm ²	l/s	l/skm ²
Lütschine Schwendi	72.20	7300	101.1	16800	232.7	974	13.5	20520	284.2	10000	138.5
Lütschine Ob. Gletscher	17.8	970	54.5	2600	146.1	19	1.1	6000	337.1	3400	191.0
Lütschine Unt. Gletscher	44.8			8100	180.8	121	2.7	8000	178.6	7700	171.9
Schwendibach	9.29	300	32.3	1300	139.9	91	9.8	660	71.0	560	60.3
Wagisbach	1.61			298	185.1	9	5.9	103	64.0		
Oberällbach	1.97					10	5.0	25	12.7		
Mühlbach*)	7.93	1200	151.3	1465	184.7	125	15.7	1144	144.3	400	50.4
Horbach	3.35	161	48.1	360	107.5	26	7.7	425	127.0	58	17.3
Bärgelbach	10.32	411	39.8	1410	136.6	88	8.5	591	57.3	224	21.7
Lugibach	4.92	97	19.7	397	80.7	0	0	214	43.5	48	9.8
Fluehbach	2.67	141	52.8	150	56.2	20	7.5	51	19.1	55	20.6
Mehlbaumbach	4.33	258	59.6	438	101.1	28	6.5	189	43.6	263	60.7
Aspengräbli	0.50	3	6.0	7	15.0						
Wärgistalbach	13.92	647	46.5	1474	106.0	50	3.6	825	59.3	207	14.9
Sandbach	2.75	8	2.9	146	53.1	5	1.8	168	61.1	43	15.6
Allouwinenbach	4.95	362	73.1	792	160.0	0	0	808	163.2		
Abwasser						60					

Die winterlichen Abflussspenden liegen um ein Vielfaches tiefer. Bei geschlossener Schneedecke wird mögliches Schmelzwasser vorwiegend von dieser aufgenommen. Man kann daher annehmen, dass im Hochwinter der Gerinneabfluss dem Gesamtabfluss aller Quellen zu diesem Zeitpunkt, damit also dem Basisabfluss des Einzugsgebietes, entspricht. Ende Februar 1981 wurden die Abflüsse der Seitenbäche gemessen, um

Hinweise auf das winterliche Wasserangebot in diesen Einzugsgebieten zu erhalten. Auf der südlichen Talseite nehmen winters die Abflussspenden mit zunehmender Nähe zu den Hochalpen ab. Dasselbe Bild zeigt sich - wenn auch etwas versteckt - auf der nördlichen Talseite. Die spezifischen Abflüsse nehmen bis zum Mühlbach ab. Dieser ist durch die Elektrizitätszentrale beeinflusst. Die aus der Aalénien-Schieferzone entspringenden Bäche unterhalb der Grossen Scheidegg zeigen ein eher uneinheitliches Bild. Eine mögliche Erklärung für die winterliche Abnahme der Abflussspenden gegen Südosten liegt in der Zunahme des hochalpinen Einflusses in der Nähe der Alpenrandstirne.

Während für die sommerlichen Abflussmengen frühere Niederschlagsereignisse oder der Tagesgang des Abflusses massgebend sein können, zeigen die in der kalten Jahreszeit durchgeführten Messungen die von Niederschlags- und Schmelzeignissen unbeeinflussten Niedrigstwassermengen an. Damit können die Abflussmessungen der Kampagne vom Winter 1980/81 auch über das hydrologische Untersuchungsgebiet bilanziert werden. Die Summe der Teilabflüsse ($0,51 \text{ m}^3/\text{s}$) entspricht nicht der Differenz ($0,925 \text{ m}^3/\text{s}$) der Lütchinen-Stationen zwischen Gletscher und Schwendi (vgl. Tab. 7). Ungefähr 400 l/s müssen im Untersuchungsgebiet ungemessen aus dem Grundwasserleiter in die Lütchine fliessen. Dies stellt einen starken **Zustrom von Grundwasser** dar. Tatsächlich haben relativ grosse Gebiete oberhalb des Dorfes (Nothalten, Dürenberg) und am Fusse des Mettenberges auch sommers keine deutliche oberirdische Entwässerung.

Wird ein Hangwasserzutritt in die Grundwasserebene oder direkt in die Lütchine vernachlässigt, müsste der Grundwasserspiegel der Talfüllung durch Exfiltration in den Wintermonaten ohne flüssigen Niederschlag (mindestens Januar und Februar) um mehr als zwei Meter absinken, um den Zustrom von rund 400 l/s erklären zu können. Tatsächlich beträgt die Spiegeldifferenz zwischen Sommer- und Winterstand im Grundwasserpumpwerk Gryth fast drei Meter. Damit kann angenommen werden, dass im Winter ein wesentlicher Anteil des oberir-

dischen Talabflusses aus exfiltriertem Grundwasser aus der Talfüllung besteht, welche ihrerseits von Niederschlagswasser im Sommer und von Hangwasser gespiesen wird.

Tab. 6: Mittlere oberirdische Abflüsse aus dem Untersuchungsgebiet Grindelwald 1980/1981 (gemessen) und langjähriges berechnetes Mittel.

mittlerer oberirdischer Abfluss 1980:	4.30 m ³ /s:	(116%)
mittlerer oberirdischer Abfluss 1981:	4.85 m ³ /s:	(129%)
Mittel der beiden Jahre	: 4.58 m ³ /s:	(122%)
Langjähriger mittlerer Abfluss	: 3.74 m ³ /s:	(100%)
Langjährige mittlere Abflusshöhe	: 1445 mm	
Langjähriger mittlerer spezifischer Abfluss	: 45.8 l/s km ²	

Im Untersuchungsgebiet korrelieren die Niederschlags-Jahreswerte gut mit denjenigen des Abflusses der Lütschine bei Gsteig. Wir nehmen deshalb an, dass dies auch für die Schwarze Lütschine bei Grindelwald und insbesondere für den oberirdischen Abfluss des Untersuchungsgebietes zutrifft. Damit kann der langjährige mittlere Abfluss des hydrologischen Untersuchungsgebietes berechnet werden (Tab. 6). Beide Untersuchungsjahre zeigen überdurchschnittlich hohe Abflussmengen.

In HERSCHY (1978:395) wird für Monats- und Jahresmittel des Abflusses allgemein eine Genauigkeit von $\pm 5\%$ angegeben. Der mittlere Fehler für Jahreswerte dürfte sich in diesem Rahmen bewegen.

5.4 Unterirdischer Zu- und Abfluss

Die geologische Beschaffenheit des Untersuchungsraumes lässt nicht ausschliessen, dass durch Karstwasserwege im chemisch leicht korrodierbaren Kalk, Wasser aus benachbarten Gebieten in das Untersuchungsgebiet zu- oder wegfliesst. Mit Hilfe der Wasserbilanz für das Untersuchungsgebiet kann überprüft werden, ob namhafte Fremdwasserzutritte oder -verluste erfolgen.

Die Abflussstationen an den Gletscherabflussgerinnen dienen dem Ziel, den oberirdischen Wasserzufluss aus den vergletscherten Gebieten zu messen, um den Wasserhaushalt über das unvergletscherte Untersuchungsgebiet bilanzieren zu können. Aus naheliegenden Gründen haben die Limnigraphen nicht direkt am Zungenende des Oberen und Unteren Gletscher aufgestellt werden können.

Die Distanz zwischen Zungenende und Abflussmessstation beträgt beim Oberen Grindelwaldgletscher (LoG) rund 300 m. Das Wasser durchfliesst hier zusätzlich einen kleinen Baggersee vor der Messstelle. Der Untere Gletscher hat sich tief in die Gletscherschlucht zurückgezogen. Aus technischen Gründen konnte die Abflussmessstation (LuG) erst bei der Aspibrücke, etwa 500 m unterhalb der Brücke am Ausgang der Gletscherschlucht errichtet werden. Hier wurden auch die Abflussmessungen 1923 - 1928 durchgeführt. Die Fließstrecke zwischen Zungenende und Messstation beträgt etwa 1800 m. Es ist somit anzunehmen, dass zwischen den Gletschern und den Messstationen ein Teil des Wassers im durchlässigen Untergrund versickert. Für die Infiltrationsverluste vor den Abflussmessstationen wird aufgrund von Beobachtungen ein mittlerer Wert von 100 l/s eingesetzt.

Nach Schätzungen können die Verlustmengen der beiden Lüttschinnen zwischen den Gletschern und den Abflussmessstationen

höchstens das Doppelte der postulierten Versickerungsmenge von 100 l/s betragen.

Die Mächtigkeit der grundwasserführenden Talfüllung im Talquerschnitt ist nicht bekannt. Im Rahmen der Baugrunduntersuchungen für die Abwasserreinigungsanlage Grindelwald wurden im fraglichen Raum mehrere Bohrungen in Tiefen von 5 bis 15 m abgeteuft, von denen nur eine randlich gelegene in 9,1m Tiefe das anstehende Schiefergestein erreicht hat. Aus den Bohrungen erkennt man, das im Gebiet der ARA (ca. 400 m unterhalb der Abflussmessstelle "Lütschine-LS" auf der linken Talseite) der Felsuntergrund auch unter der Talsohle fast senkrecht in die Tiefe abfallen muss.

Um die Durchlässigkeit der Lütschinsenschotter zu überprüfen, wurden damals in einer Bohrung zwei Füllversuche durchgeführt, welche Werte von

$$\begin{aligned} k_f &= 1,6 \quad 10^{-2} \quad \text{m/s} \quad \text{und} \\ k_f &= 4,4 \quad 10^{-4} \quad \text{m/s} \quad \text{ergaben.} \end{aligned}$$

Die Zusammensetzung der Lütschinsenschotter ist sehr unterschiedlich. Tonig-siltige Kiessande zeigen Einschwemmungen von Gehängeschutt an. Es treten aber auch saubere Flussschotter mit schlammigen Zwischenlagen auf.

Die in GUENZLER-SEIFFERT, WYSS (1938:25) und in KIENHOLZ (1977:64) beschriebenen postglazialen Blockschuttmassen, die aus dem Gebiet des Rötihorns stammen, haben das ursprüngliche, vom Gletscher ausgehobelte Tal im Gebiet vor der Engstelle in der Schwendi seitlich aufgeschüttet. Im Talquerschnitt der Messtation bei der Schwendibrücke, dürfte daher der Grundwasserleiter mindestens 150 m breit sein (inklusive Trümmermaterial auf beiden Talseiten. Da man im Zentrum des Talkessels mit der 40 m tiefen Bohrung für das Grundwasserpumpwerk Gryth das Anstehende nicht erreicht hat (RYSER 1966), kann im Bereich Schwendi der Grundwasserstauer durchaus bedeutend tiefer unter dem heutigen Talboden liegen.

Für die Berechnung des Grundwasserstromes, der bei Schwendi das Untersuchungsgebiet verlässt, setzen wir eine mittlere Grundwassermächtigkeit von rund 40 m ein. Nach dem Gesetz von DARCY und den daraus folgenden Beziehungen berechnet sich die unterirdische Abflussmenge als

$$Q = F \cdot k_f \cdot I,$$

wobei F : Querschnittfläche des durchströmten Grundwasserleiters

k_f: Durchlässigkeitsbeiwert

I : Spiegelgefälle

Für I wird aus Mangel an genügend Grundwasserbeobachtungen das Gefälle der Lutschine bei Schwendi von ca. 12‰ eingesetzt, als Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s eingesetzt. Dies dürfte den beobachteten Lagerungs- und Korngrößenverhältnisse des Grundwasserstromes nahekommen. Damit erhalten wir für den unterirdischen Abfluss aus dem Untersuchungsgebiet im Jahresschnitt

$$\begin{aligned} Au &= (150 \cdot 40) \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,012 \\ &= 360 \text{ l/s} \quad = 140 \text{ mm Jahresabflusshöhe} \end{aligned}$$

Die Angabe des unterirdischen Abflusses beruht auf Schätzungen aufgrund der punktuellen Kenntnisse der Durchlässigkeit der grundwasserführenden Schichten bei der Talenge von Schwendi. Der Fehler dürfte 50 % nicht übersteigen.

5.5 Rücklage und Aufbrauch

Durch die beiden an den Abflüssen des Oberen und Unteren Grindelwaldgletschers installierten Abflussmessstationen können die beiden Gletschereinzugsgebiete vom eigentlichen Untersuchungsgebiet abgetrennt werden. Es muss daher nur Rücklage und Aufbrauch im praktisch unvergletscherten Tal-kessel Grindelwalds beurteilt werden.

Im alpinen Raum kann das Niederschlagswasser als Schnee und Eis oder als Grundwasser (inkl. Bodenwasser) gespeichert werden. Rücklagen in Form von Schnee und Alteis sind im hydrologischen Untersuchungsgebiet vernachlässigbar klein. Sie beschränken sich auf den kleinen Gutzgletscher am Wetterhorn und einige Lawinenkegel an dessen Fusse, sowie auf die Schnee- und Eisfelder der Eigernordwand. Ueber ihren Massenhaushalt sind keine Zahlen bekannt. Wir nehmen an, dass sie die Wasserbilanz des Untersuchungsgebietes nicht oder nur sehr gering beeinflussen, so dass sie in der Bilanzierung des Wasserhaushaltes nicht berücksichtigt werden.

Die Grundwasserspeicher in Grindelwald lassen sich unterscheiden in Quellreservoirs und grundwasserführende quartäre Talfüllungen. Aus der altersmässigen Zusammensetzung des Wassers (Kap. 6.3.1) erkennt man, dass die Quellwasserspeicher auch im Winter bei sehr starkem Rückgang der Quellschüttung oder sogar beim Abgehen der Quellen nicht auslaufen können. Zum Teil müssen grosse Wassermengen auch in der kalten Jahreszeit im Speichergestein zurückbleiben. Sie werden erst später beim Eindringen von frischem Infiltrat nach und nach ausgepresst. Durch die Schneeschmelze mit ihrem grossen Wasseranfall werden die Speicher vollständig gefüllt. Von der Zeit der Schneeschmelze in den Haupteinzugsgebieten der Quellen (Schüttungsmaximum) bis zur winterlichen Minimalschüttung nimmt die Schüttungsmenge generell ab. Dieser Vorgang wird unterbrochen durch episodische Niederschlagsinfiltrationen, die den Wasserdruck im Reservoir und

mit ihm die Quellschüttung ansteigen lassen. Mit erstaunlicher Genauigkeit kennen die Einheimischen die Zeit der minimalen Quellschüttung oder sogar des Abgehens von Quellen, wie sich dies Jahr für Jahr auf einige Tage genau wiederholt. Aus der Konstanz der Schüttungsabnahme im Herbst kann geschlossen werden, dass die herbstlichen Niederschläge für die Reservoirfüllung nur unwesentlich sind.

Damit dürften die Reservoirs der Quellen jeweils zu gleichen Zeiten im Herbst verschiedener Jahre etwa die gleiche Wasserfüllung aufweisen. Die Differenz von Jahr zu Jahr der unterirdisch gespeicherten Wassermenge darf deshalb bei der Bilanzierung zu Null gesetzt werden.

Die grundwasserführende Talfüllung ist durch den Vertikalbrunnen der Pumpstation Gryth (vgl. Abb. 1) angebohrt. Diese einzige Porengrundwasser-Beobachtungsstelle im Untersuchungsgebiet zeigt grosse Spiegelschwankungen im Jahresverlauf. Während im Sommer nach der Schneeschmelze minimale Flurabstände von 20 bis 40 cm gemessen werden, sinkt im Winter der Spiegel bis gegen 3 m unter Flur ab. Im Jahre 1981 wurde der Grundwasserspeicher gegenüber dem Vorjahr um rund 50 cm angereichert. Bei einem wassergängigen Porenvolumen von angenommen 30% entspricht dies einem Spiegelanstieg von 160 mm. Die grundwasserführende Talebene ist 1,26 km² gross, entsprechend 1,5% des hydrologischen Untersuchungsgebietes. Für den Wasserhaushalt des Untersuchungsraumes ist damit die Grundwasserspeisung dieses zweiten Messjahres mit etwas weniger als 3 mm Wassersäule, berechnet auf die Gesamtfläche, unbedeutend.

Messungen des Bodenwassergehaltes wurden in Grindelwald keine durchgeführt. Bei der relativ geringen Bodenmächtigkeit im alpinen Raum wird sich die Bodenwassergehaltsänderung nicht merkbar auf den Gesamtwasserhaushalt auswirken. Das Bodenwasser bleibt daher in der Bilanz unberücksichtigt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Rückhalt und Verbrauch der Wasserreserven in der Bilanzrechnung im allgemeinen vernachlässigbar klein sind.

5.6 Wasserbilanz

Die Basis der hydrologischen Bilanzierung bildet das hydrologische Jahr, beginnend mit dem 1. Oktober. Zu diesem Zeitpunkt sind die Schneereserven des Vorjahres auch im alpinen Gebiet aufgebraucht. Unter der Voraussetzung, dass jeweils zu Beginn des hydrologischen Jahres die Speicherverhältnisse gleich sind, kann man annehmen, dass sich das Niederschlags- und das Verdunstungsgeschehen eines Jahres im Abflussverhalten widerspiegelt.

Mit den für die einzelnen Wasserhaushaltsglieder ermittelten Grössen kann die Wasserbilanz für das Untersuchungsgebiet erstellt werden. Es sind die Werte des langjährigen Mittels angegeben, die mit Hilfe der langjährigen gemessenen Niederschläge (SMA Grindelwald) und Abflüsse (Lütschine - Gsteig) berechnet wurden (Tab. 7).

Tab. 7: Wasserbilanzwerte des hydrologischen Untersuchungsgebietes Grindelwald. Niederschlag (N), unterirdischer Zufluss (Zu), oberirdischer Abfluss (Ao), unterirdischer Abfluss (Au), Verdunstung (V), Rücklage (R), Fremdwasserzutritt δ .

	N	+	Zu	+	δ	=	Ao	+	Au	+	V	+	R
1980	1949	+	40	+	37	=	1664	+	140	+	222	+	? 0
1981	2194	+	40	+	10	=	1877	+	140	+	224	+	3
lang- jähriges Mittel	1720	+	40	+	55	=	1445	+	140	+	230	+	0

Der Niederschlag und der Abfluss der Untersuchungsjahre liegen über, die Verdunstung unter dem langjährigen Mittel. Die unterirdischen Zu- und Abflüsse wurden als konstante Grössen eingesetzt. Die Reservenänderungen fallen nicht ins Gewicht.

Der δ -Wert muss als Fremdwasserzutritt interpretiert werden. In einem niederschlagsreichen Jahr ist grundsätzlich vermehrter Fremdwasserzutritt zu erwarten. Es zeigt sich aber eine umgekehrte Tendenz. Die beiden Messjahre 1980 und 1981 mit unternormaler Sonnenscheindauer aber übernormalen Niederschlagsmengen, weisen gegenüber dem Normaljahr weniger Fremdwassereinfluss auf (kleinerer δ -Wert).

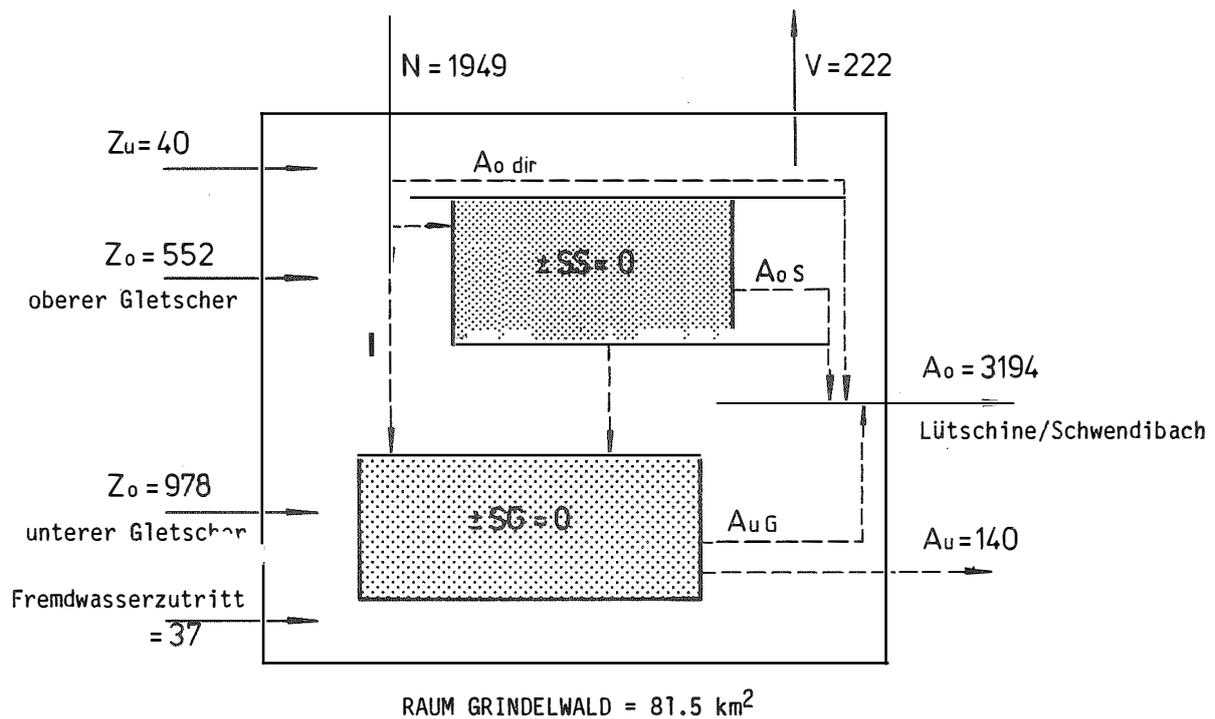


Abb. 14: Wasserbilanzmodell des Untersuchungsgebiets Grindelwald. Zahlenwerte der hydrologischen Jahre 1980/81 in mm. Die internen Wasserabflüsse sind nicht bestimmt worden.

Wasseraustritte aus dem Gebiet nordwestlich des Untersuchungsraumes sind gemäss den geologischen Verhältnissen unwahrscheinlich. Hingegen ist ein Fremdwasserzutritt aus dem Gebiet der Hochalpen anzunehmen. In niederschlagsreichen aber strahlungsschwachen Jahren liefern diese vergletscherte Gebiete weniger Wasser als in Jahren mit normaler oder über-

normaler Sonnenscheindauer. Ein Fremdwasserzutritt aus dem Gebiet der Hochalpen von 55 mm Jahresmittel ergibt einen durchaus plausiblen Zustrom von rund 140 l/s. Die Postulierung von Fremdwasserzutritten aus dem Gebiet der vergletscherten Hochalpen aufgrund der Wasserbilanz ist bei Berücksichtigung der Unsicherheiten zwar nicht zwingend. Das Austreten von Gletscherwasser in Quellen des Untersuchungsgebietes konnte dann aber experimentell nachgewiesen werden (vgl. Kap. 6).

Das Wasserbilanzmodell zeigt die In- und Outputs an Wasser im Untersuchungsgebiet unter Angabe der effektiven Werte für die Jahre 1980 - 81 (Abb. 14). Im Modell sind auch die internen Wasserflüsse eingezeichnet. Der direkte oberirdische Abfluss ($A_{o\ dir}$), hier dem Oberflächenabfluss entsprechend, ist nicht bestimmt worden. Die Infiltration (I) wurde als Grundwasserneubildung über das Einheitsflächenmodell pro Einheitsfläche berechnet (vgl. Kap. 6.2.1.) Die in 56 Testflächen ermittelte Grundwasserneubildung betrug im Mittel 660 mm. Die Neubildung aus der Schneeschmelze ist dabei mit eingerechnet. Die Abflüsse aus den Schnee- und Grundwasserspeichern (A_{oS} und A_{uG}) in den Vorflutern sind ebenfalls nicht direkt bestimmt. Aus den Messungen der Niedrigwasserabflüsse lässt sich aber ein Exfiltrationswert (A_{uG}) aus dem Grundwasser in die Lütschine von rund 400 l/s, entsprechend 155 mm Wassersäule, bezogen auf die gesamte Einzugsgebietsfläche, berechnen. Der Schneespeicher (SS) ist für beide Jahre zu Null gesetzt, da die Ausaperung am Ende des hydrologischen Jahres vollständig war. Der Grundwasserspeicher (SG) weist im Jahre 1981 eine Rücklage von umgerechnet 3 mm Wassersäule auf. Er hat sich somit gegenüber dem gleichen Zeitpunkt des Vorjahres nicht gleich stark entleert. Der Schwendibach fließt erst unterhalb der Abflussmessstation "Schwendi" in die Lütschine. Er gehört aber mit seinem Einzugsgebiet zum Untersuchungsgebiet.

6. POTENTIAL

6.1 Allgemeines

Das hydrologische Potential ist definiert als die Leistungsfähigkeit des Hydrosystems oder einzelner Systemkomponenten in Bezug auf die jeweilige Fragestellung. Im landschaftsökologischen Sinne ist es ein Teil des gesamten Landschaftspotentials und als solches nur in seiner Beziehung mit den übrigen Umweltfaktoren relevant. Die Landschaftsökologie muss sich dabei aber auch auf einzelne Messgrößen zur Kennzeichnung dieses Potentials stützen. Die Auswahl ist abhängig von der Fragestellung. Ein allgemeingültiges Wasserpotential gibt es nicht.

Das hydrologische Potential kann erst aus der Bewertung des Naturdargebotes hinsichtlich der jeweiligen Fragestellung ermittelt werden. Aus wasserwirtschaftlicher Sicht ist das Potential beispielsweise in Bezug auf folgende Nutzungen zu bestimmen: Trink- und Brauchwasser, Bewässerung, Wasserkraft, Ernährungsraum (Fische u.a.), Transportweg, Abwasserentsorgung, Wärmequelle, Erholungsmedium (Landschaftswert), Sportmedium.

Das Potential kann je nach Zielsetzung und Möglichkeiten in quantitativen Größen (Bsp. m^3/s) oder in qualitativer Form (Bsp. hohes Potential) beschrieben werden.

Gemäss den Vorerkundungsergebnissen müssen im Raume Grindelwald für Trink- und Brauchwasser, Abwasserentsorgung und Erholungsmedium hydrologische Potentiale bestimmt werden. Unbedeutende Potentiale könnten auch für Wasserkraft und Ernährungsraum noch ausgewiesen werden.

Das Potential des Wassers als Erholungsmedium im Sinne des landschaftlichen Wertes ist im Rahmen der Landschaftsbewertungs-Untersuchungen bearbeitet worden (GROSJEAN 1986). Die zu dieser Thematik im Grindelwaldprojekt erhaltenen Impulse sind in methodischer und praktischer Weise in anderen Regionen umgesetzt worden (LEIBUNDGUT 1986).

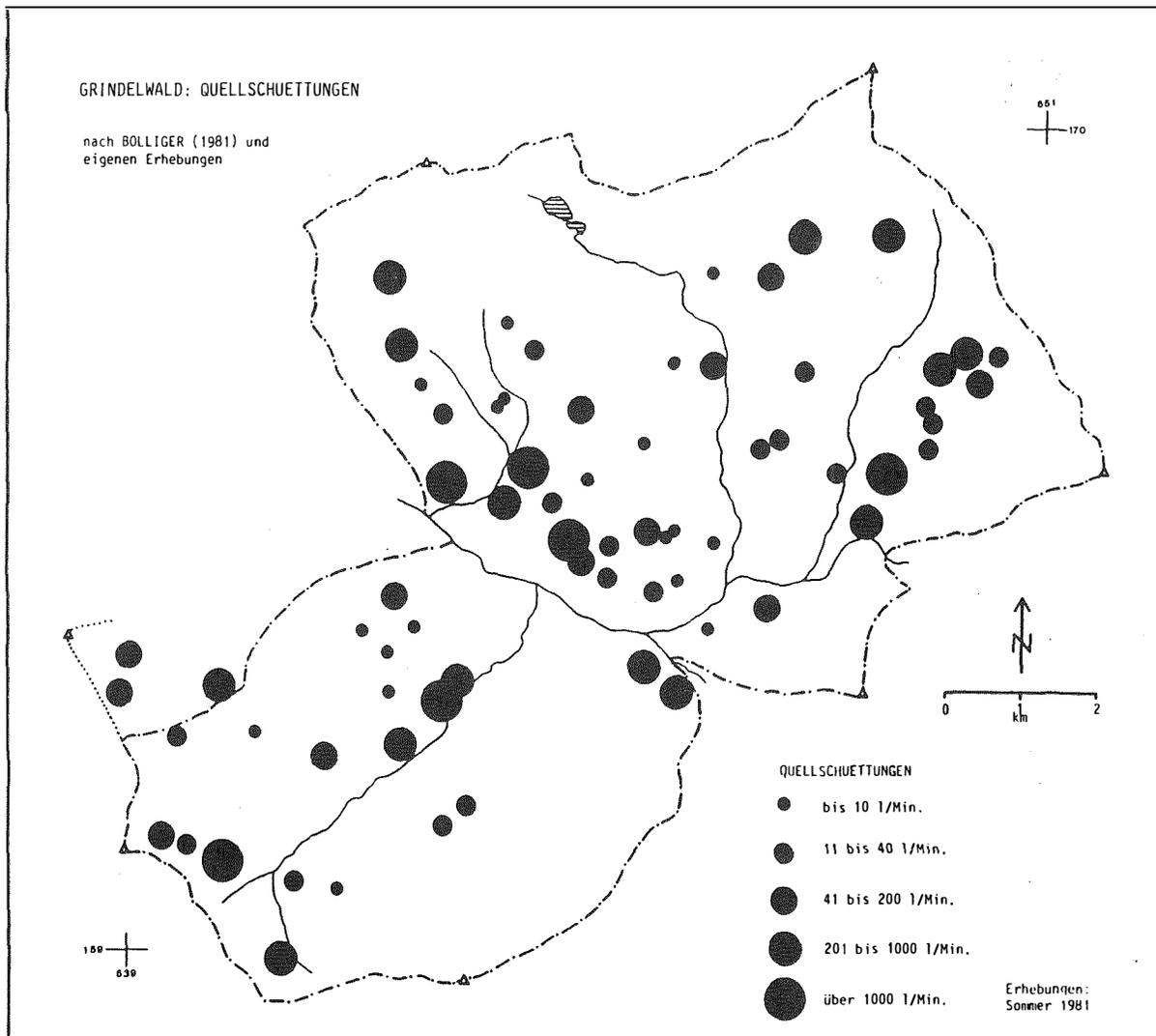


Abb. 15: Die wichtigsten Quellen im Raume Grindelwald in räumlicher Verteilung, klassiert nach der Quellschüttung im Sommer 1981.

Das Abwasserentsorgungspotential des Untersuchungsraumes wird an der Vorflutkapazität beim Talausgang beziffert.

Das bedeutendste hydrologische Potential des Raumes Grindelwald im Sinne des MAB-Projektes muss als Trinkwasserpotential definiert werden. Dieses wird durch Quellwasser, ergänzt mit Porengrundwasser aus der Talfüllung, repräsentiert. Sowohl über das Einheitsflächen-Modell (Kap 6.2) als auch über den Konvergenz-Ansatz (Kap 6.3) wird deshalb die Hydrologie der Quellen eingehend behandelt.

Der Talkessel von Grindelwald kann als ausgesprochen quellenreich bezeichnet werden. Von den gesamthaft etwa 150 Quellen sind in der Abbildung 15 deren siebenzig kartographisch dargestellt. Es handelt sich um die Quellen die in die Untersuchungen miteinbezogen wurden. Bei den restlichen Quellen handelt es sich um Quellen mit minimalen Schüttungen und/oder sehr grossen Ergiebigkeitsschwankungen. Die räumliche Verteilung ist trotz lokaler Häufungen recht gleichmässig. Sechs Quellen schütteten im Sommer 1981 über 1000 l/min, 14 zwischen 200 und 1000 l/min, 12 schütteten 40 - 200 l/min, 17 zwischen 10 und 40 l/min und die restlichen 21 Quellen schütteten im Mittel weniger als 10 l/min. Das Gesamtdargebot der erfassten Quellen lag zu dieser Zeit über 20'000 l/min.

Seit alters her beruht die Wasserversorgung auf der Nutzung der vielen, oft jedoch schüttungsschwachen Quellen. Die Wasserversorgung bestand bis Ende des letzten Jahrhunderts aus Einzelversorgungen, die sich meist auf die Fassung kleinerer Quellen beschränkten. Mit der Gründung und dem Ausbau der öffentlichen Wasserversorgung und privater Versorgungsgenossenschaften in Mühlebach und Wärgistal wuchs die Bedeutung der grossen Quellen am oberen Rand des Dauersiedlungsgebietes für die Trinkwasserversorgung (vgl. Abb. 9). Das Interesse hat sich so von den kleinen, einfach zu fassenden Quellen für Einzelversorgungen auf die schüttungsstarken Wasseraustritte für Gemeinschaftsversorgungen verlagert. Seit der Gründung der Wasserkommission und dem Bau des Versorgungsnetzes sind immer mehr private Einzelversorgungen durch die Gemeindeversorgung verdrängt worden. Heute sind im

Bereich der Dauersiedlung die meisten grösseren Quellen durch die Gemeinde oder private Versorgungsgenossenschaften genutzt und die neueren Häuser und Ställe an das Versorgungsnetz angeschlossen worden. Obschon auch im überbauten Gebiet noch private Quellen genutzt werden, sind doch viele Wasserfassungen im Dorfgebiet aufgegeben worden.

Aus Gründen der Versorgungssicherheit wurde durch die Gemeinde zusätzlich das Talgrundwasser über die Pumpstation Gryth (vgl. Abb. 10) erschlossen. Damit kann bei minimalem Quellwasserangebot und gleichzeitigem Spitzenverbrauch zur Zeit der Winter-Hochsaison oder auch im Brandfall Wasser ins Netz eingespeist werden.

6.2 Einheitsflächenmodell - HYPOT

Dem Aufbau des hydrologischen Modells liegt die hydroökologische Denkweise zugrunde, die die physikalisch-hydrologischen Phänomene entsprechend der jeweiligen Fragestellung zu anderen Umweltfaktoren und zur Aktivität des Menschen im Raum in Beziehung setzt. Die hydrologischen Untersuchungen liessen erkennen, dass das Hauptproblem der Gemeinde Grindelwald im hydrologischen Sektor bei der Beschaffung von genügend und qualitativ einwandfreiem Trinkwasser liegt. Daher beschränkt sich auch das flächendeckende hydrologische Modell auf die Erfassung und Wertung des in Bezug auf die Fragestellung wesentlichsten hydrologischen Systemfaktors Quellwasser in quantitativer und qualitativer Hinsicht.

Um der vom Gesamtprojekt her gegebenen Zielvorgabe nach flächendeckenden Aussagen gerecht zu werden, wurde über ein sogenanntes Einheitsflächenmodell (EF-Modell) das Potential pro Flächeneinheit nach Menge und Güte berechnet. Zusätzlich erlaubt das Modell auch die Beurteilung des Potentials in Bezug auf Landnutzungsänderungen, wie sie in der Phase der Projektsynthese vorgenommen werden muss.

Die Einheitsflächen wurden ab Luftbild nach den Kriterien Hangneigung, Exposition und Vegetation, im Talgutbereich nach den Grundstückparzellen ausgeschieden. Der Homogenitätsgrad bezüglich Hydrologie kann daher sehr unvollkommen sein. Dieses "Einheitsflächen-Hydrologie-Modell" muss operationalisierbar sein, um die Szenarium-Variationen in der Gesamtprojektsynthese auf höherer Integrationsstufe zu ermöglichen.

Um pro Flächeneinheit direkt das Potential bestimmen zu können werden die Bestimmungsgrößen Sickerwasserqualität, Reinigungswirkung und Grundwasserneubildungsrate herangezogen. Die Einflussfaktoren wurden in Teilmodelle aufgelöst. Während die Kriterien Niederschlag und Verdunstung quantitativ

eingehen können, sind alle übrigen nur bewertet. Als Messgrößen sind die in Abbildung 16 (Flussdiagramm) aufgeführten Komponenten herangezogen worden. Die nicht-hydrologischen Größen sind aus der MAB-Datenbank übernommen worden. Sie stammen von anderen Arbeitsgruppen.

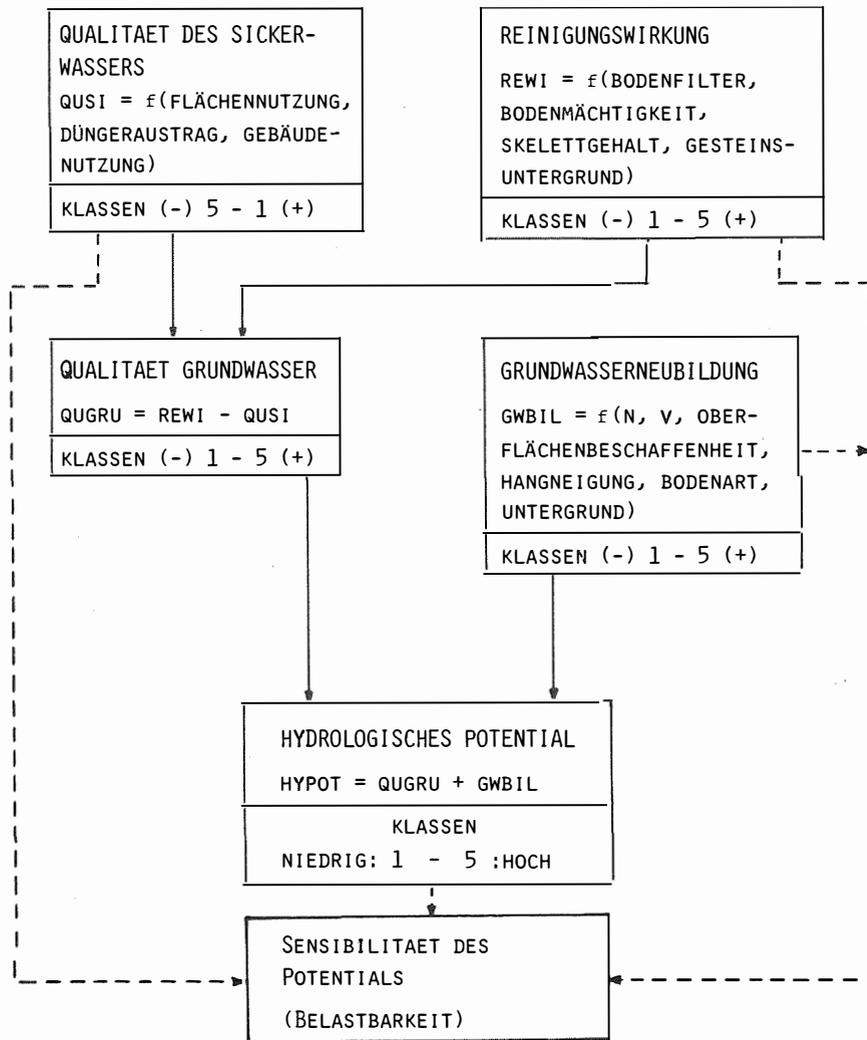


Abb. 16: Flussdiagramm des Einheitsflächenmodells mit den Teilsystemen zur Bestimmung des hydrologischen Potentials (nach FELBER 1983, ergänzt).

Um das Einheitsflächen-Modell überhaupt speisen zu können, musste ein **Bewertungsverfahren** herangezogen werden. Grundlage der Bewertungen ist die empirisch bekannte Beziehung zwischen einer Messgröße (Bsp. Hangneigung) und deren hydrologischer Wirkung. Um keine nicht vorhandene Genauigkeit vorzutäuschen, wurde eine nur fünfstufige Skala gewählt. Die

Güte der Aussage ist abhängig von der Qualität der Bewertung. Im folgenden wird das Modell kurz beschrieben. Die technischen Einzelheiten sind im Bericht von FELBER (1983) festgehalten.

Das hydrologische Modell beruht auf der maschinellen Bearbeitung der pro Einheitsfläche (ca. 5000) in der MAB-Datenbank abgespeicherten Feldresultate verschiedener Arbeitsgruppen. Aus der flächendeckenden Beschreibung des hydrologischen Potentials bezüglich Grundwasser sollte abgeleitet werden können, wo die für die Trinkwasserversorgung wichtigen Regionen liegen, welche zur Erhaltung des Potentials nötig sind. Die Anwendung des Modells auf verschiedene Varianten der Landnutzung erlaubt, die Sensibilität des hydrologischen Systems zu beurteilen.

Mit dem quantitativen Teilmodell soll die Grundwasserspeisung pro Einheitsfläche berechnet werden. Jährliche Niederschlags- und Verdunstungshöhen sowie Vegetations- Boden- und Untergrunddaten stehen zur Berechnung der Grundwasserneubildung (GWBIL) pro Einheitsfläche zur Verfügung.

Die Bewertung der Qualität (Wasserbeschaffenheit) des neugebildeten Grundwassers erfolgt über zwei Untermodelle:

- Aus den Daten über die Landnutzung (Vegetation, Siedlung) wird die Qualität des zur Versickerung gelangenden Wassers abgeschätzt (QUSI).
- Aus den Angaben über Bodenbeschaffenheit und Untergrund ergibt sich die klassierte Reinigungswirkung gegenüber dem in der entsprechenden Einheitsfläche versickernden Wassers (REWI).

Aus der Qualität des Sickerwassers im Vergleich zur Reinigungswirkung des durchsickerten Filters kann die Qualität des gebildeten Grundwassers im Teilmodell QUGRU beurteilt werden.

Mit der Berechnung des Potentials einer Einheitsfläche wird ihre Relevanz für die Bildung von qualitativ gutem Grundwasser und damit auch ihre Bedeutung für die Wasserversorgung von Grindelwald erfasst. Aus diesem Grund wird der **Qualität des Grundwassers gegenüber der Menge ein höheres Gewicht** beigemessen. Wasser, das in einer Einheitsfläche oberflächlich oder oberflächennah abfließt, jedoch in benachbarten Einheitsflächen grundwasserwirksam wird, kann im Rahmen dieser Potentialberechnungen nicht berücksichtigt werden.

Für die **Szenierung** kann das hydrologische Potential aus den in der Datenbank abgespeicherten Grundlagen (Grundwasserneubildung GWBIL, Regenerationswirkung des durchsickerten Filters REWI, Qualität des versickernden Wassers QUSI) mit einer entsprechend angepassten Gewichtung neu berechnet werden.

In den nachfolgenden Modellbeschreibungen werden die in der MAB-Datenbank benutzten Codierungen der aufgenommenen Merkmale wiederverwendet. Dazu wird die Position des entsprechenden Merkmals in der Datenbank angegeben (z.B.: Bodentyp: codiert B - Z, Position F(227)). Zum Nachvollzug der Berechnungen muss deshalb das Benutzerhandbuch der MAB-Grindelwald-Datenbank, insbesondere der Datenbeschrieb, zu Rate gezogen werden.

Die Resultate der drei Basis-Modelle werden für jede Einheitsfläche wiederum in der Datenbank gespeichert, um nicht bei einer späteren Weiterverwendung dieser Werte (z.B. abweichende Gewichtung bei anderer Fragestellung) die zeitraubenden Berechnungen nochmals flächendeckend durchführen zu müssen.

Zur Anpassung der Modelle an die MAB-Datenbank wurden die Modelle auf eine Auswahl von **56 Test-Einheitsflächen**, die auf einem Querschnitt durch das Untersuchungsgebiet (Faulhorn - Eiger) liegen, angewendet. Von diesen Testflächen blieben nur deren 2 nicht bearbeitbar (keine Bodendaten vorhanden, Kartierung von "Wald" und "Vegetation" nicht flä-

chendeckend). Die Anwendung der drei Teil-Modelle auf diese Testflächen kann Anhaltspunkte über die Diskrepanz zwischen Modell und Anschauung (Geländekenntnis) aufdecken.

6.2.1 Grundwasserneubildung - GWBIL

Die Berechnung der Menge des neu gebildeten Grundwassers pro Einheitsfläche basiert auf der flächendeckenden Kenntnis der Niederschlags- und Verdunstungsverhältnisse. Die Beurteilung des Einflusses der naturräumlichen Ausprägung der Einheitsfläche (EF) auf die Sickerwassermenge erfolgt anhand der Bewertung einzelner Faktoren. Das Resultat dieses Teilmodells (Grundwasserneubildungsmenge in mm/Jahr) setzt sich aus einem quantitativen und einem Bewertungsteil zusammen. Die Interpretation der modellierten Grundwasserneubildung erlaubt Gebiete mit unterschiedlicher Grundwasserneubildungsrate auszuscheiden.

$$\text{GWBIL} = (N - V) \cdot \text{OFL} \cdot \text{HANE} \cdot \text{BOD} \cdot \text{UGRU} \quad (\text{mm})$$

OFL : Oberflächenbeschaffenheit

HANE : Hangneigung

BOD : Bodendurchlässigkeit

UGRU : Durchlässigkeit des Untergrundes

Ihr Wert wird als Position F(643) in der MAB-Datenbank abgespeichert.

Als Vorläufer zum Einheitsflächenmodell wurde eine Karte der Grundwasserneubildung erarbeitet (Abb. 17). Die Karte entstand durch die Ueberlagerung der nach ihrer Bedeutung für die Grundwasserspeisung gewichteten Raumfaktoren Geologie

(nach GEOLOGISCHER ATLAS DER SCHWEIZ), Bodenverhältnisse (nach SCHEURER 1981), Hangneigung (nach digitalem Gelände-
modell von KUNZ 1982), Flächennutzung (nach Angaben von NAEGELI 1982) und Niederschlagsverteilung.

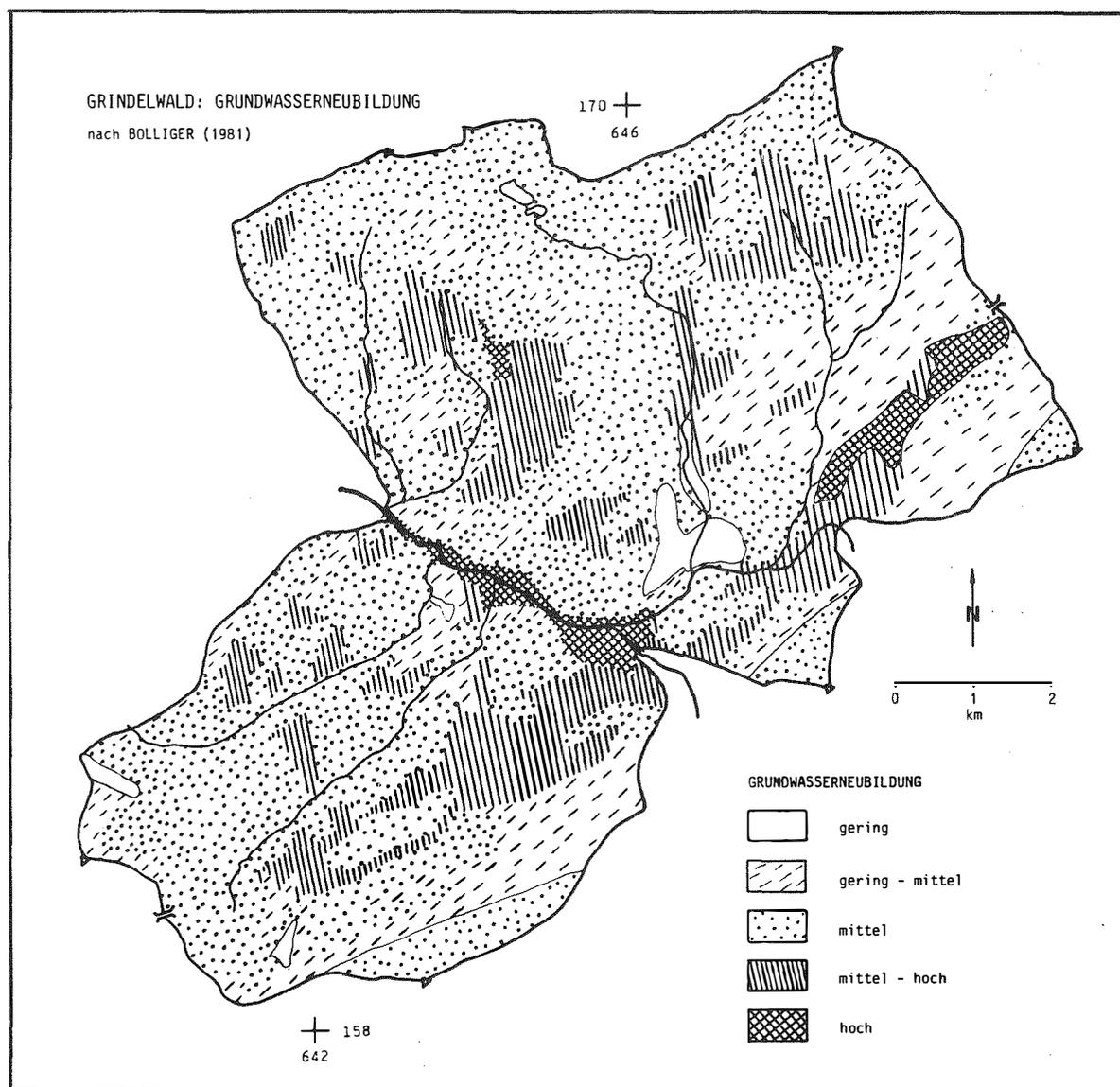


Abb. 17: Klassierte Grundwasserneubildung in räumlicher Verteilung im Untersuchungsgebiet Grindelwald.

Aus der Karte können keine quantitativen Angaben zu Versickerungswerten abgelesen werden. Die Aussagen bleiben aufgrund der Kartenkonstruktion nach einem dimensionslosen Punktsystem qualitativ. Die Überlegungen, die zur Herleitung und Gewichtung der fünf Stufen der Grundwasserspeisung geführt haben, werden in BOLLIGER (1981:22 ff) diskutiert. Nachstehend werden einige Erläuterungen zur Karte der Grundwasserneubildung gegeben.

Die am Fusse der Wetterhornwand infiltrierenden Wässer speisen den meist etwa auf der Höhe von Schwendibühl (649000/165700) aus dem Lockermaterial austretenden Lugibach, während die nahegelegene Quelle Klecki überwiegend altes Gletscherwasser schüttet das aus einem Karst und/oder Kluftsystem im Wetterhornkalk in das Lockermaterial austritt und das jüngere Infiltrat unterlagert.

Das Gebiet des Schuttstroms vom Rötihorn wird nach den Modellvorstellungen (vgl. Abb. 30) bereits durch die Quelle Bachhalten und weiter unten von der ebenfalls durch die Gemeinde gefassten aber viel kleineren Quelle Wagisbach entwässert.

Das Gebiet mit überdurchschnittlicher Speisung nördlich des Dorfes Grindelwald entspricht ungefähr den mit Quartär bedeckten Aalénien-Schiefern. Im westlichen Teil dieses Gebietes entspringt die Quelle Tuft.

Die Schutt- und Moränenablagerungen, die dem als Stauer wirkenden Aalénien überlagert sind, mögen wohl als Einzugsgebiet für kleinere Quellen im Dorfgebiet wirken, doch ist die Moränenschicht wahrscheinlich zu geringmächtig, als dass sie die Wassermassen einer grösseren Quelle zu fassen vermöchte. Im Einschnitt des Mühlbachs liegen in der Talung unterhalb Bachläger Moränenreste, aus denen verschiedene kleinere Quellen gespiesen werden. Hier ist auch die Quelle Niederbach durch die Bergbahnen Grindelwald-First AG gefasst. Dieser grösste bekannte Wasseraustritt in dem Gebiet wird zur Versorgung des Restaurants Bort genutzt.

Die beiden Schreckfeld-Quellen - sie dienen zur Versorgung des Restaurants First - und die Quelle bei Grindel-Oberläger liegen im Gebiet grösserer Neubildungsrate nordwestlich der grossen Scheidegg. Das Einzugsgebiet dieser Quellen ist nach unseren Kenntnissen jedoch eher in den über dem Aalénien-Schiefer liegenden Bajocien-Kalken zu suchen. Aufgrund der Neubildungsrate sind im Gebiet des unteren Lagers Quellen zu erwarten, die ihr Einzugsgebiet in der dünnen Moränenbedeckung des Aalénien-Schiefers haben und daher im Winter kaum viel Wasser liefern dürften.

Weitere Quellaustritte sind auch im Vorfeld des Oberen Gletschers zu finden, wo die Hangschuttablagerungen von der Lüttschine angeschnitten sind. Hier liegt neben verschiedenen diffusen Wasseraustritten die Quelle Gletschersand, die von einer privaten Versorgungsgenossenschaft genutzt wird. Auf der gegenüberliegenden Seite der Lüttschine sind zudem verschiedene weitere Wasseraustritte bekannt, die jedoch für eine Nutzung ungünstig tief gelegen sind.

Das unterhalb des Mittellegigrates ausgeschiedene Gebiet überdurchschnittlicher Grundwasserneubildungsrate ist ziemlich steil und unwegsam. An seinem Uebergang in die Grundwasserebene sind mehrere Quellen bekannt (Nellenbalm, Quelle des Luterbächleins), die aber für eine Fassung zur Versorgung des Dorfes zu tief liegen und zudem im Winter abgehen. Auch die beiden kleinen Quellen bei Alpiglen, die das nahe Restaurant versorgen, haben ihr Einzugsgebiet in der gleichen Fläche. Im Waldgebiet oberhalb Trychelegg (645300/165500) sind uns keine fassungswürdigen Quellen bekannt.

Im Gebiet Itramen sind einige eher kleine Areale mit erhöhter Neubildungsrate ausgeschieden. Hier könnten eventuell in einer heute oberflächlich trockenen Rinne, die in der Falllinie des Breitmoos (641400/162500) liegt und wahrscheinlich einem altem Bachlauf entspricht, noch ungenutzte Wasservorkommen erschlossen werden.

Die Genauigkeit der Berechnung der Grundwasserneubildung hängt in erster Linie von der Präzision der abgespeicherten Niederschlags- und Verdunstungswerte und der Saisonalität ab. Diese kann allerdings nicht berücksichtigt werden. Bei der Uebertragung der Verdunstungskarte auf die EF-Karte ergeben sich Unschärfen.

Die Genauigkeit des die Berechnung der Grundwasserneubildung dominierenden Gliedes Niederschlag/Verdunstung liegt bei etwa $\pm 15\%$ (vgl. Kap. 5.6). Wird für die oben erwähnten 56 Testflächen die Grundwasserneubildung berechnet, ergibt sich ein mittlerer Wert von rund 660 mm/Jahr. Bei einem jährlichen Gebietsmittel des Niederschlags von 1720 mm entspricht dies einem Wert von rund 38 % des Inputs an Wasser. Damit bewegen wir uns an der oberen Grenze des von RICHTER und LILLICH (1975:195) für Bergländer angegebenen Prozentzahlen der Grundwasserneubildung.

Die Neubildungswerte scheinen absolut eher zu gross zu sein. Die relativen Unterschiede sind nach den Felderfahrungen für die 56 Testflächen plausibel. Die absoluten Neubildungswerte werden zur Berechnung des hydrologischen Potentials nicht direkt, sondern nur klassiert verwendet. Es wird demnach mit relativen Unterschieden weitergearbeitet.

Obschon die absoluten Werte der Grundwasser-Neubildung möglicherweise etwas hoch liegen, sind die räumlichen Unterschiede der Grundwasserneubildung gut erfasst. Die Berechnung des hydrologischen Potentials erscheint plausibel.

6.2.2 Nutzungsbedingte Qualität des Sickerwassers - QUSI

Die Bedeutung der im Niederschlag enthaltenen Wasserinhaltsstoffe ist im Vergleich zu den Veränderungen, die sich bezüglich Wasserqualität an der Erdoberfläche abspielen, sehr gering. Die menschlichen Aktivitäten im Raum bestimmen weitgehend die Qualität des zur Versickerung gelangenden Wassers. Es soll daher über die Wertung der Landnutzung im Raum Grindelwald versucht werden, die Wasserqualität des in einer bestimmten Einheitsfläche oberirdisch und unterirdisch zum Abfluss gelangenden Wassers zu bewerten. Unter der Annahme, dass das als Niederschlag die Erdoberfläche erreichende Wasser von hoher Güte sei, wird die Beeinträchtigung seiner Qualität durch die Landnutzung durch Mensch und Tier mit Zahlen zwischen 1 und 5 bewertet. Dabei bedeutet der Wert 1, dass das Wasser hier seine bestmögliche Qualität hat, d.h. nicht verschmutzt ist. Der Wert 5 wird für eine hohe Belastung der Sickerwasserqualität eingesetzt. Mit dieser Bewertung wird somit qualitativ die Güte des in einer Einheitsfläche zur Versickerung oder zum Abfluss bereitstehenden Niederschlagswassers beurteilt.

Die Beeinträchtigung der Qualität des zur Versickerung bereitstehenden Wassers berechnet man aus den obigen Bewertungen der einzelnen Faktoren zu

$$\text{QUSI} = (\text{NUTZ} + \text{DUNG} + \text{GEB}) : 3 \quad , \text{ gerundet}$$

NUTZ : Flächennutzung

DUNG : Düngeraustrag

GEB : Gebäudenutzung

QUSI wird auf Position F(648) in die Datenbank integriert.

Im Gegensatz zur Beurteilung der Grundwasserneubildung liegen der Bemessung der Qualität des Sickerwassers und der Reinigungswirkung des durchsickerten Mediums keine quantitativen Messdaten zugrunde. Mit den beiden relativ einfachen

Modellen wird versucht, je ein in der Natur äusserst komplexes und kaum überblickbares System zu erfassen. Die in den einzelnen Modellen behandelten Systemelemente (z.B. Düngeraustrag) mussten oft anhand anderer, für sie als repräsentativ angenommenen Kriterien (z.B. Vegetationsart) beurteilt werden. Jedes Systemelement wurde einer der Klassen 1 bis 5, entsprechend seiner angenommenen Wirkung zugeordnet.

Die Wahl der bewerteten Systemelemente, der sie annähernden Einflussfaktoren und deren Bewertung wurde mit den interessierten MAB-Mitarbeitern besprochen und die eingesetzten Gewichte gemeinsam festgelegt. Da es sich jeweils um relative Angaben handelt, kann die Wahrscheinlichkeit einer Fehleinschätzung kaum beurteilt werden. Die Anwendung der beiden Teilmodelle auf die 56 Testflächen ergab Bewertungsstufen, deren gegenseitige Grössen jedoch durchaus den Vorstellungen aus den Geländekenntnissen entsprechen.

6.2.3 Reinigungswirkung des Bodens und des Untergrundes - REWI

Anhand dieses Teilmodells soll beurteilt werden, wie gross die **Reinigungswirkung** (Regenerierung) einer Einheitsfläche für eventuell verschmutztes **Sickerwasser** ist. Für jede Einheitsfläche wird die Reinigungswirkung in 5 Klassen anhand der kartierten und für diese Grösse als relevant betrachteten Boden- und Untergrundeigenschaften abgeschätzt. Klasse 1 enthält die Einheitsflächen mit kleinster, Klasse 5 diejenige mit grösster Filterkraft.

$$\text{REWI} = \frac{9 \cdot \text{BOFI} + 8 \cdot \text{BOMAE} + 3 \cdot \text{SKEL} + 4 \cdot \text{GEST}}{24}$$

BOFI : Bodenfilter
 BOMAE : Bodenmächtigkeit
 SKEL : Skelettgehalt des Bodens
 GEST : Filterkraft des Grundwasserleiters

REWI wird als F(649) abgespeichert. Da der Bodentyp mit unterschiedlichen Anteilen an Tonmineralien und die Mächtigkeit der Bodenschicht für die Filtrierung des Sickerwassers entscheidend sind, werden diese beiden Faktoren entsprechend stark gewichtet.

6.2.4 Qualität des pro Einheitsfläche gebildeten Grundwassers - QUGRU

Die Bewertung der Qualität des gebildeten Grundwassers erfolgt durch Bilanzierung der positiven und negativen Einflüsse auf diesen Faktor, d.h. durch Subtraktion der Sickerwasserqualität QUSI (Wertebereich 1 - 5) von der Reinigungswirkung der Filterschicht REWI (Wertebereich 1 - 5). Dabei entstehen ganzzahlige Werte zwischen -4 und +4 als Beurteilungsmassstab für die Güte des Grundwassers. Fällt stark verunreinigtes Sickerwasser auf einer Fläche mit geringster Reinigungswirkung an, wird auch das dort gebildete Grundwasser von minimaler Qualität sein (Wert -4). Bewegt sich unbeeinflusstes Sickerwasser durch einen guten Filter, ergibt dies den Wert +4 für die Qualität des Grundwassers. Heben sich positive und negative Einflüsse auf (Wert 0), kann eine mittlere Grundwasserqualität angenommen werden.

Tab. 8: Grundwasserqualität (QUGRU) klassiert als Beurteilung des in einer Einheitsfläche gebildeten Grundwassers. REWI: bewertete Reinigungswirkung, QUSI: bewertete Qualität des Sickerwassers.

REWI - QUSI	Beurteilung	klassiert QUGRU
-4 -3	schlechte Qualität	1
-2 -1	schlechte bis mittlere Qualität	2
0	mittlere Qualität	3
+1 +2	gute bis mittlere Qualität	4
+3 +4	gute Qualität	5

Der Wertebereich -4 bis +4 wird in 5 Klassen der Grundwasserqualität QUGRU eingeteilt (Tab. 8). Der klassierte Wert QUGRU wird auf Platz F(650) in die Datenbank aufgenommen. Er beschreibt die Qualität des in einer bestimmten Einheitsfläche autochton gebildeten Grundwassers. Der klassierte Wert QUGRU fließt nun in die Beurteilung des hydrologischen Potentials bezüglich Grundwasser ein.

6.2.5 Flächendeckende Bewertung des hydrologischen Potentials - HYPOT

Aus der Kenntnis heraus, dass in Grindelwald die Trinkwassergewinnung eine kritische und möglicherweise limitierende Grösse ist, soll mit der hier beschriebenen Modellvorstellung das hydrologische Potential bezüglich Trinkwasser für jede Einheitsfläche beschrieben werden.

Tab. 9: Klassierte Werte der Grundwasserneubildung (GWBKL).

GWBIL in mm	<350	351-550	551-750	751-950	>=951
GWBKL klassiert	1	2	3	4	5

Tab. 10: Das hydrologische Potential (HYPOT) bestimmt nach der klassierten Grundwasserneubildung (GWBKL) und der Grundwasserqualität.

HYPOT		GWBKL (Quantität)				
		1	2	3	4	5
QUGRU (Qualität)	1	1	1	2	2	2
	2	2	2	2	3	3
	3	2	3	3	3	4
	4	3	3	4	4	4
	5	4	4	4	5	5

Das hydrologisches Potential einer Einheitsfläche ist gleichbedeutend mit ihrer Leistungsfähigkeit für die Bildung von nutzbarem Trinkwasser. Ihr Potential ist hoch, wenn viel qualitativ gutes Grundwasser gebildet wird, ihr Potential ist tief, wenn wenig und/oder qualitativ schlechtes Grundwasser gebildet wird.

Zur Berechnung des hydrologischen Potentials HYPOT wird zuerst die Menge des neugebildeten Grundwassers (GWBKL) klassiert (Tab. 9). Bei der abschliessenden Berechnung des Potentials hat die Wassergüte gegenüber der gebildeten Menge vorrangige Bedeutung. Sie wird deshalb bei der Berechnung von HYPOT aus klassierter Quantität und Qualität des Grundwassers doppelt gewichtet.

$$\text{HYPOT} = \frac{2 \cdot \text{QUGRU} + 1 \cdot \text{GWBKL}}{3} \quad (\text{gerundet})$$

Der für jede Einheitsfläche berechnete Wert HYPOT (Wertebereich 1 bis 5) nimmt in der Datenbank Position F(645) ein (Tab. 10). Der Wert 5 entspricht einem hohen, der Wert 3 einem mittleren und der Wert 1 einem niedrigen hydrologischen Potential.

6.2.6 Resultate und Beurteilung

Das Ergebnis der über das Einheitsflächenmodell berechneten Potentiale ist in Abbildung 18 ausschnittsweise dargestellt. Von den insgesamt ca. 150 Quellen im Einzugsgebiet Grindelwald sind diejenigen von grösster Bedeutung, die für die Gemeindeversorgung genutzt werden. Das sind die Quellen Klecki, Bachhalten, Schattenhalb, Tuft und Wagisbach. Die Quellen Anggistalden, für deren Nutzung sich die Gemeinde

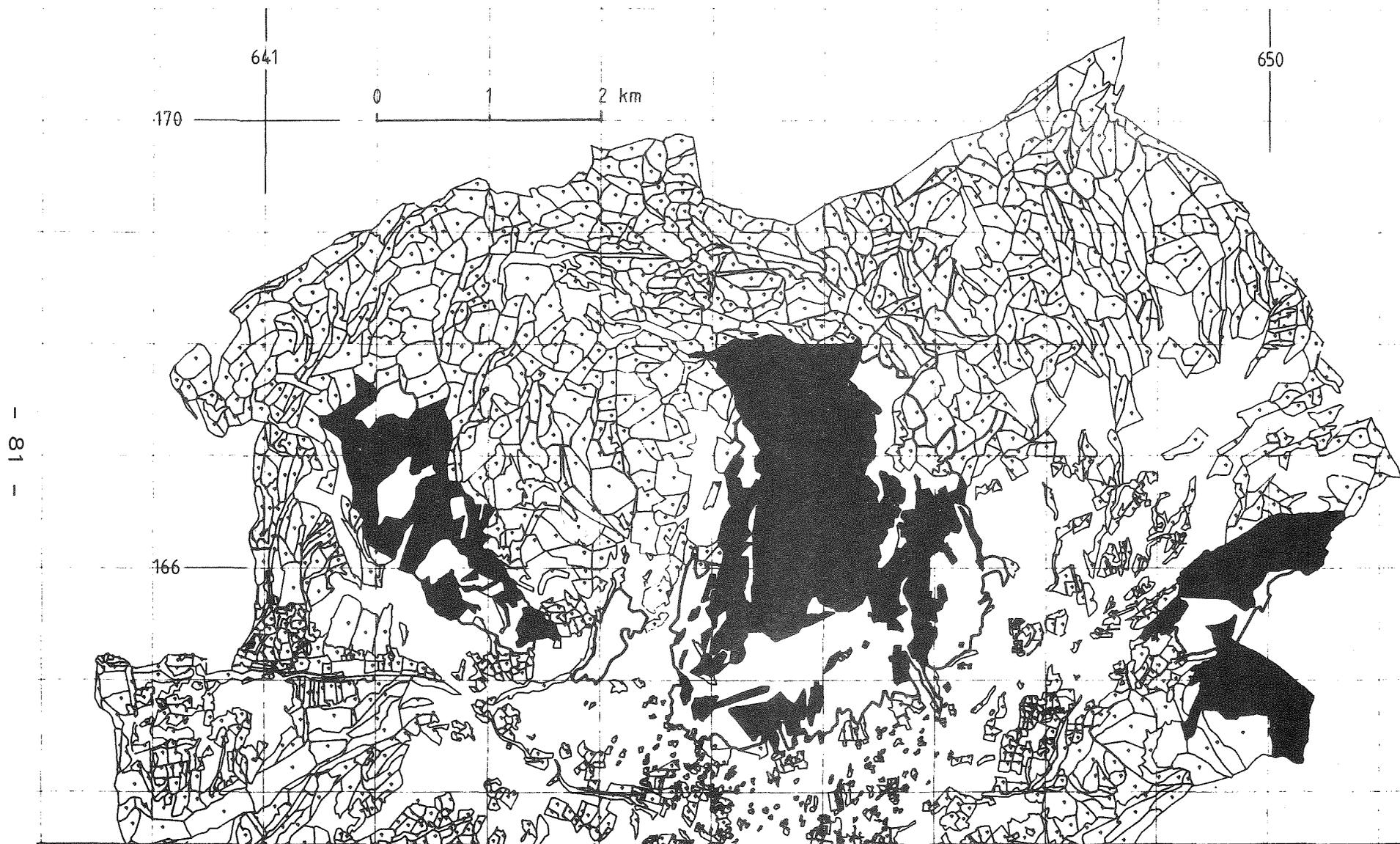


Abb. 18: Ausschnitt aus der HYPOT-Karte des Einheitsflächenmodells. Die mit Punkte belegten Einheitsflächen weisen ein hohes hydrologisches Potential der Klassen 4 und 5 aus (vgl. Tab. 10). Die Einzugsgebietsgrenzen der grossen Quellen sind schwarz ausgezogen, die schwarzen Flächen entsprechen hohem hydrologischen Potential (Klasse 4, 5), die weissen Flächen mittlerem oder kleinem Potential (Klassen 3, 2, 1).

Grindelwald interessiert, wurde ebenfalls in die Untersuchung mit einbezogen. Sie werden in Kapitel 6.3 speziell behandelt. Zusätzlich wurden einige kleine Quellen ausgewählt, die bezüglich ihrer Wasserhygiene eindeutig einzuordnen waren. Zum einen handelt es sich um Quellen, die zu allen drei Messterminen einwandfreies Trinkwasser aufwiesen, zum anderen um Quellen, die mindestens einmal massiv durch Fäkalbakterien verunreinigt waren (FELBER 1982:132 ff).

Die Anwendung des hydrologischen Flächenmodells auf die Quelleinzugsgebiete führte im wesentlichen zu folgenden Ergebnissen:

- a) Es überwiegen Einheitsflächen mit hohem Potential (Klasse 4). Einheitsflächen, die ein sehr hohes Potential aufweisen, treten recht selten auf (Ausnahme Schattenhalb und sind häufig an die Landnutzung "Wald" gekoppelt.
- b) Einheitsflächen mit mittlerem und niedrigem Potential treten bei allen Quellen auf, die für die Gemeindeversorgung genutzt werden. Dabei sind die Einheitsflächen mit niedrigem Potential an die Anwesenheit von Siedlungen gebunden (Alphütten, Läger, Restaurants). Demzufolge konzentrieren sich diese potentiell gefährdenden Flächen auf die Vorsasszone und die Alpweiden.
- c) Die eigentliche Landnutzung (Wiese, Weide, Wald) spielt für die Beurteilung der Grundwasserqualität nur eine untergeordnete Rolle. Der entscheidende Faktor ist die Siedlung (auch Einzelgebäude). Wo sie vorhanden ist, treten schlechte Qualitäten auf, in der näheren Umgebung mittlere und wo sie fehlt, kommen gute oder sehr gute Qualitäten vor. Damit wird deutlich, dass Landnutzungs-Szenarien nur dann zu wesentlichen Änderungen führen, wenn auch gleichzeitig die Siedlungsstruktur verändert wird.

- d) Die anfängliche Vermutung, dass sich hohe grundwassergefährdende Flächenanteile im Einzugsgebiet der Quellen durch eine mangelhafte Wasserbeschaffenheit (bakteriologisch) an den Quellen ausdrücken, konnte bei den grossen Quellen nicht bestätigt werden. Das liegt einerseits an den sporadischen Messungen der Wasserhygiene, die keine zuverlässigen Beurteilungen zulassen. Andererseits ist zu bedenken, dass eine einzige Einheitsfläche mit schlechter Qualität inmitten von Flächen mit sehr guter Qualität ausreicht, eine eventuelle bakteriologische Verunreinigung des Wassers zu erklären.
- e) Beim Betrachten der oben erwähnten kleinen Quellen, die im Bezug auf ihre Wasserqualität relativ sicher beurteilt werden konnten, zeigt sich, dass in den Einzugsgebieten von den Quellen, die zu jedem Messtermin hygienisch einwandfreies Wasser lieferten, auch keine Flächen mit schlechter Qualität (d.h. keine Siedlungen im Einzugsgebiet) auftreten. Bei den fünf Quellen, die mindestens einmal massiv verunreinigt waren, sind in der Umgebung der Fassung Flächen mit mittlerer oder/und schlechter Qualität zu finden. Dies gilt jedoch nicht für die Quelle Nellenbalm, die zwar an einem Termin massiv verunreinigt war, aber im Einzugsgebiet nur Flächen mit guter und sehr guter Qualität aufweist. Das deutet darauf hin, dass im Modell Einflussfaktoren nicht berücksichtigt werden (z.B. Art und Zustand der Quellfassung), die offensichtlich eine Rolle spielen.

Es besteht eine deutliche Diskrepanz in Menge und Güte zwischen der Modell-, Input- und Outputinformation. Die Inputinformationen sind für ein Einzugsgebiet dieser Grösse recht detailliert bekannt. Diese Tatsache gestattet es, zahlreiche Parameter im Modell zu berücksichtigen. Da jedoch die Outputinformationen, wie z.B. Güte des Grundwassers in der Fläche, nicht hinreichend bekannt sind, können die Modellergebnisse nicht verifiziert werden.

Um diesen Mangel zu beheben, wären folgende Schritte notwendig:

- Häufigere Messungen der Wasserhygiene an allen Quellen, um sie zuverlässiger beurteilen zu können.
- Gleichzeitiges Beobachten der menschlichen Aktivitäten im Quelleinzugsgebiet. Wann wird wieviel Dünger auf welche Fläche ausgebracht?
- Messungen der Grundwasserqualität nicht nur bei der Quelle, sondern auch an einzelnen repräsentativen Stellen im Einzugsgebiet. Stimmt die gemessene Wasserqualität in der jeweiligen Einheitsfläche mit den Modellvorstellungen überein?
- Durchführen von Markierversuchen um die Grösse und Lage der Quelleinzugsgebiete absichern zu können und um die unterirdischen Aufenthaltszeiten ermitteln zu können.

Bezüglich der Grundwasserneubildung wäre dieses Modell noch **ausbaufähig**.

6.3 Analyse des Hauptelementes Quellwasser mittels Konvergenzansatz

Mit dem Einheitsflächenmodell kann das hydrologische Potential flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet bestimmt werden. Damit lassen sich die kritischen Flächen ermitteln, so dass die nötigen Detailstudien gezielt angesetzt werden können.

Im Gegensatz zum Einheitsflächenmodell kann mit dem Konvergenzverfahren eine direkte Beziehung zwischen den hydrologischen Daten und dem Raum geschaffen werden. Damit können aber nur die mit Daten belegten Einzugsgebiete bearbeitet werden.

Die theoretischen Grundlagen sind bereits in Kapitel 3.3.3 beschrieben worden. Nachstehend werden die über das Konvergenzverfahren erhaltenen Resultate für die einzelnen Quellen diskutiert. Die Auswertung stützt sich hier vor allem auf Daten der Quellschüttung, der Temperatur und Leitfähigkeit, der Wasserbeschaffenheit, der isotopenhydrologischen Untersuchungen einerseits und der Raumanalyse andererseits.

6.3.1 Hydrologische Grundlagen

a) Quellschüttungen

Die Schüttungen der grossen, meist gefassten Quellen wurden kontinuierlich gemessen. Die Daten sind in der Tabelle 11 zusammenfassend dargestellt. Die Diskussion erfolgt bei der Besprechung der einzelnen Quellen (Kap. 6.3.1 ff).

Die Schüttungsdaten der monatlich untersuchten Quellen Anggistalden, Holenstein und Buessalp beruhen auf Einzelwerten und die Schüttungsdaten der Quelle Tuft basieren auf Schätzungen, da es unmöglich ist, ihren Erguss zu messen. Für den Grundwasserbrunnen Gryth stützen sich die Angaben auf den monatlich gemessenen Flurabstand des Grundwassers (vgl. Abb. 10). Die Grössenordnungen der Schüttungen der übrigen untersuchten Quellen sind kartographisch in 5 Klassen festgehalten (vgl. Abb. 15).

Tab. 11: Mittlere jährliche Schüttungsmenge der grossen Quellen im Untersuchungsgebiet Grindelwald.

Quelle	Nr	mittl. Q l/Min.	jährl. Q m ³	mittl. N mm	Einzugsgebiets- fläche km ²
Klecki	1	6300	3.31·10 ⁶	2000	6.62
Bachhalten	4	800	0.42·10 ⁶	1700	1.00
Schattenhalb	5	300	0.16·10 ⁶	1550	0.41
Anggistalden	7	1500	0.79·10 ⁶	1700	1.86
Buessalp ML	16	150	0.08·10 ⁶	1800	0.17
Holenstein	19	150	0.08·10 ⁶	1800	0.17
Tuft	2	5000	2.63·10 ⁶	1700	6.18

Um die Kenntnisse über Vorkommen und Mechanismen des Hauptelementes "Quellen" zu vertiefen, wurde dieser Projektteil durch BOLLIGER (1981) speziell untersucht. Die Untersuchung umfasste drei Teilziele: Quellen-Kartierung, Quellen-Typisierung und das Herausarbeiten der Bedeutung der Quellen für die Siedlungsstruktur.

Mit Hilfe von Luftbildern und Archivaufzeichnungen wurden in Feldarbeit die vorhandenen Unterlagen und Kenntnisse über die Quellen in Grindelwald ergänzt. Neben den hydrologischen Parametern Schüttung, Wassertemperatur und Leitfähigkeit

wurden Daten zu Zustand und Nutzung der Quellen sowie zur Landnutzung und den geologisch-morphologischen Verhältnissen erhoben. Die Resultate der aufgenommenen 92 Quellen sind in drei Karten dargestellt.

Im Raum Grindelwald sind hauptsächlich zwei Quelltypen zu erwarten:

im autochthonen Sedimentmantel und in den Kalken der Wildhorndecke vor allem Karstquellen und

in den übrigen Gebieten vorwiegend kleine Quellen aus Block-, Gehängeschutt und Moränematerial.

Eine weitere Typisierung konnte nicht durchgeführt werden. Einerseits ist die Bandbreite der hydrologischen Eigenschaften einer Quelle zu gering und andererseits lässt die äusserst heterogene Raumausprägung eine Zuordnung zu einzelnen Raumeinheiten nicht zu.

Zu allen Zeiten bildete das Wasser einen wichtigen Standortfaktor für die Siedlung. Da früher die technischen Möglichkeiten geringer waren, spielte die Lage der Wasservorkommen eine relativ grössere Rolle als heute. Falls der Standortfaktor Wasser zur Siedlungsentwicklung von Grindelwald eine entscheidende Rolle gespielt hat, müsste für die Zeit vor 1983 (Bau des Wasserversorgungsnetzes) eine signifikante Beziehung zwischen Häusern und Quellenstandorten bestehen. Die Untersuchungen zeigten aber, dass andere Standortfaktoren in ihrer Gesamtheit gewichtiger waren als die Quellenstandorte. Wie häufig in unseren niederschlagsreichen Gebieten war das Trinkwasserangebot über die zahlreichen Quellen so gross, dass es nur untergeordnet steuernd wirkte.

Die bekannten grösseren, ungenutzten Wasseraustritte sind für die Fassung und Nutzung durch die Gemeinde eher problematisch. Durch eine tiefere Fassung bereits genutzter Quellen, z.B. Tuft, könnte jedoch voraussichtlich mehr Wasser,

das heute durch die alten Quellstränge nicht erfasst wird, gefördert werden.

Da das Potential des Untersuchungsgebietes in Bezug auf grössere, einwandfreie Quellwasservorkommen in günstiger Lage ziemlich erschöpft zu sein scheint, wird bei einem Ausbau der Wassererschliessungsanlagen das Grundwasser im Talboden zusätzlich genutzt werden müssen. Der Flurabstand des heute qualitativ guten Grundwassers bei Gryth kann im Sommer sehr gering sein, so dass strikte Schutzmassnahmen in der Umgebung des Brunnens getroffen werden müssten, auf die wir hier allerdings nicht eingehen können.

b) Wasserbeschaffenheit

Die Wasserbeschaffenheit wird nachstehend für alle Quellen zusammenfassend, nach chemischer und hygienischer Güte, behandelt. Die Daten der grossen Quellen werden detailliert in den betreffenden Kapiteln (Kap. 6.3 ff) behandelt.

Das mengenmässige Potential kann durch die Wasserbeschaffenheit modifiziert werden. Als Steigerung kommt allerdings nur eine sehr hohe, günstige Mineralisation in Frage, so dass das betreffende Wasser als Mineralwasser genutzt werden könnte. Naheliegender und normal ist eine Potentialminderung durch das Vorhandensein von Komponenten in zu hohen Konzentrationen (Bsp. Nitrat) oder durch das Vorkommen von Verschmutzungsanzeigern (Bsp. Coli-Bakterium).

In Tabelle 12 sind die Resultate der hydrochemischen Analysen der Kampagne vom Juli 1981 aufgelistet. Es sind nur die Hauptkomponenten aufgeführt. Die Wassertemperaturen dieser hochsommerlichen Stichprobenmessung lagen zwischen 2,6°C (Quelle Salzegg) und 10,2°C (Quelle Nothalten). Der Mittelwert der gemessenen Quellwassertemperaturen beträgt 5°C bei einem Variationskoeffizient von 0,35. Die generell tiefen Temperaturen widerspiegeln den beträchtlichen Ein-

fluss der Schmelzwässer auf die Quellen, bzw. deuten auf eine Phasenverschiebung von Monaten zwischen der Speisung und der Schüttung in den Quellen hin, beträgt doch die Juliisotherme der Lufttemperatur in Grindelwald 14,0°C.

Die pH-Werte liegen zwischen 7,24 und 8,28, mit einem Ausreisser von 6,37 der Quelle Sattellegg. Dieses Quellwasser weist gleichzeitig die niedrigsten Werte in der elektrischen Leitfähigkeit, der Gesamt-, Calcium- und Hydrogenkarbonathärte auf. Die pH-Werte liegen in einem für Trinkwasserzwecke günstigen Bereich. Die Leitfähigkeiten schwanken entsprechend der unterschiedlichen Mineralisation der Quellen zwischen rund 60 und 900 µS sehr stark.

Tab. 12: Daten zur Wasserbeschaffenheit der Quellen im Untersuchungsgebiet Grindelwald. Erläuterungen sh. Fliesstext.

Nr	Quelle	Datum	Zeit	T _m °C	Q l/min.	pH	Leitf. µS/cm	SiO ₂ mg/l	GH °FH	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	NO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l	PO ₄ (P) µg/l
1	Kleckli	14. 7.81	17.30	4.3	10850	7.78	162	1.09	8.9	28	3.00	0.21	0.04	103.7	0.4	1.0	< 2	10
2	Tuft Hauptquelle	14. 7.81	19.00	6.8		7.80	502	4.22	26.5	64	17.44	4.65	0.54	209.8	0.5	0.3	102	9
3	Tuft Messbecken	15. 7.80	16.30	7.0	137		520	4.77	25.9	67	18.70	4.08	0.52	206.4	0.4	0.5	110	21
4	Bachhalten	14. 7.81	15.15	5.8	1050	7.82	325	3.08	18.3	46	11.65	1.19	0.43	164.7	0.5	1.4	42	11
5	Schattenhalb	14. 7.81	08.45	4.2	311	7.83	295	3.02	16.3	47	6.40	0.73	0.23	150.3	0.5	0.5	34	7
6	Waglsbach	14. 7.81	19.30	7.0		7.69	356	3.61	18.1	54	9.33	1.61	0.56	170.8	0.4	1.7	34	16
7	Anggistalden	14. 7.81	19.30	6.1	~3000	7.90	179	2.00	9.7	33	1.42	0.28	0.10	109.8	0.5	0.9	7	12
8	Gletschersand	14. 7.81	18.00	4.3	~ 50	7.37	212	1.44	12.3	40	2.10	0.27	0.12	141.5	0.4	1.1	4	12
9	Blaserie	14. 7.81	17.00	5.8	~ 50	7.24	93	1.65	5.0	15	2.22	0.21	0.15	51.2	0.5	0.3	7	12
10	Grindel Oberläger	14. 7.81	16.00	3.7	120	7.86	203	2.47	11.3	40	1.59	0.36	0.05	125.7	0.4	0.7	8	13
11	Niederbach	14. 7.81	13.00	6.0	45	7.68	278	2.74	15.1	43	7.45	4.01	0.24	142.7	0.4	0.4	35	14
12	Unt. Schreckfeld	14. 7.81	15.30	3.3	610	7.75	226	2.49	13.5	45	1.59	0.40	0.00	146.4	0.4	1.0	9	9
13	Ob. Schreckfeld	14. 7.81	15.00	3.8	~2000	7.86	195	2.65	11.4	36	2.25	0.47	0.05	119.6	0.4	0.7	9	8
14	Holewang	14. 7.81	18.00	6.0	30	7.63	370	2.96	19.2	51	10.00	6.68	0.37	176.9	0.3	0.7	57	10
15	Nothalten	14. 7.81	18.15	10.2	2	7.25	308	4.74	17.0	56	1.22	0.65	0.05	204.9	0.4	0.2	3	18
16	Buessalp Mittelläger	14. 7.81	16.15	4.8	220	7.62	208	2.00	11.8	40	0.99	0.21	0.42	133.0	0.4	1.2	3	21
17	Buessalp Oberläger	14. 7.81	17.00	3.4	81	7.72	149	1.65	8.7	29	0.81	0.16	0.00	97.6	0.5	0.3	< 2	9
18	Wasservers. Itramen	15. 7.80	11.50	5.4	1105		410	3.20	21.0	63	8.78	1.00	0.20	198.6	0.4	0.8	51	51
19	Holenstein	14. 7.81	14.15	3.7	137	7.25	96	2.31	5.5	19	0.67	0.16	0.06	63.4	0.5	0.3	< 2	6
20	Wasserwendi	14. 7.81	10.30	4.2	~ 60	7.42	247	2.02	13.3	48	1.30	0.31	0.08	153.7	0.4	0.6	8	12
21	Höche Hubel	14. 7.81	11.00	2.9	~ 20	7.52	195	2.22	11.3	37	1.70	0.15	0.11	126.9	0.5	2.8	5	14
22	Sattellegg	14. 7.81	11.40	2.9	~200	6.37	61	2.35	5.3	8	1.46	0.04	0.06	59.8	0.4	0.5	< 2	14
23	Alpiglen Chrütmatte	14. 7.81	11.30	3.8	~100	7.75	262	1.00	15.8	50	2.85	0.06	0.00	183.0	0.4	0.6	< 2	8
24	Alpiglen Langenegg	14. 7.81	11.20	3.7	62	8.05	217	0.67	12.7	42	1.09	0.04	0.05	145.2	0.4	0.6	< 2	12
25	Salzegg	14. 7.81	09.00	2.6	410	8.28	139	0.72	7.8	26	0.97	0.00	0.00	87.8	0.5	0.9	< 2	13
26	Bustiglen	14. 7.81	09.30	3.6		8.16	160	2.21	8.5	19	2.69	0.38	0.00	84.2	0.4	0.7	12	9
27	Nellenbalm	14. 7.81	19.15	4.7	~	7.97	102	0.46	5.7	20	0.65	0.02	0.00	62.2	0.5	1.9	7	6
28	Sulz	14. 7.81	19.00	4.8	71	7.53	280	1.31	17.0	54	4.53	0.14	0.26	196.4	0.4	1.4	6	5
29	Hubel	14. 7.81	18.15	8.2	90	6.78	900	4.57	66.8	98	34.87	10.60	1.02	492.9	0.5	0.3	312	11
30	Grundwasser Gryth	14. 7.81	19.15	6.1	A=205	8.07	192	2.78	11.0	36	2.53	0.54	0.29	111.0	0.4	2.0	12	13

Bei den Kationen treten in den am stärksten mineralisierten Quellen neben den Härtebildnern Calcium und Magnesium auch leichte Natrium- und Kaliumgehalte auf, die jedoch mit wenigen Ausnahmen unter 1 mval % bleiben. In den Quellen am Fusse der autochthonen Kalk-Wände am Rande der Flyschserien fehlt das Natriumion fast vollständig. Ammonium wurde selten und dann nur an der Nachweisgrenze festgestellt. Einzelne erhöhte Werte bei den Quellen Holenstein, Hubel, Bachhalten, Tuft, Nellenbalm und Nothalten können durch Oberflächeneinfluss bedingt sein. Die Summe des 2- und 3-wertigen Eisens war nur in höchstens einigen Mikrogramm pro Liter nachweisbar.

Auf der Anionen-Seite ist nebst dem in hohem Masse vertretenen Hydrogenkarbonation (Karbonathärte) noch der Gehalt an Sulfat von Bedeutung. Er ändert parallel zur Gesamtmineralisation von Quelle zu Quelle sehr stark. Mehrere Quellen enthalten einen wesentlichen Anteil an Sulfat: Hubel und Tuft je etwa 40 mval %, die Wässer der Quellen Bachhalten, Schattenhalb, Niederbach, Holewang und WV Itramen sind mit mehr als 20 mval % ebenfalls ziemlich sulfathaltig.

Die Menge der Nitrationen variiert mit der Gesamthärte der Quellwässer, ihre Konzentration liegt jedoch mit 0,5 bis höchstens 3 mg/l weit unter den im Trinkwasser aus Quellen des intensiv landwirtschaftlich genutzten Mittellandes üblichen Werten. Auch das Chloridion, das in höheren Konzentrationen zusammen mit andern Wasserinhaltsstoffen ein Verschmutzungsindikator sein kann, tritt nur in der Grössenordnung von 0,5 mg/l auf und ist damit kaum anthropogenen Ursprungs. Phosphat (als P) und Nitrit sind ebenfalls nur in Konzentrationen von wenigen Mikrogramm pro Liter nachzuweisen.

Auf dem Hintergrund einer nach dem GEOLOGISCHEN ATLAS DER SCHWEIZ (Blatt 396 Grindelwald) vereinfachten geologischen Kartenskizze ist in Abbildung 19 die mittlere Gesamthärte der beprobten Quellen, klassiert nach französischen Härte-

graden (fH), dargestellt. Die Gesamthärte wurde titrimetrisch bestimmt oder als Summe der Calcium- und Magnesiumhärten berechnet.

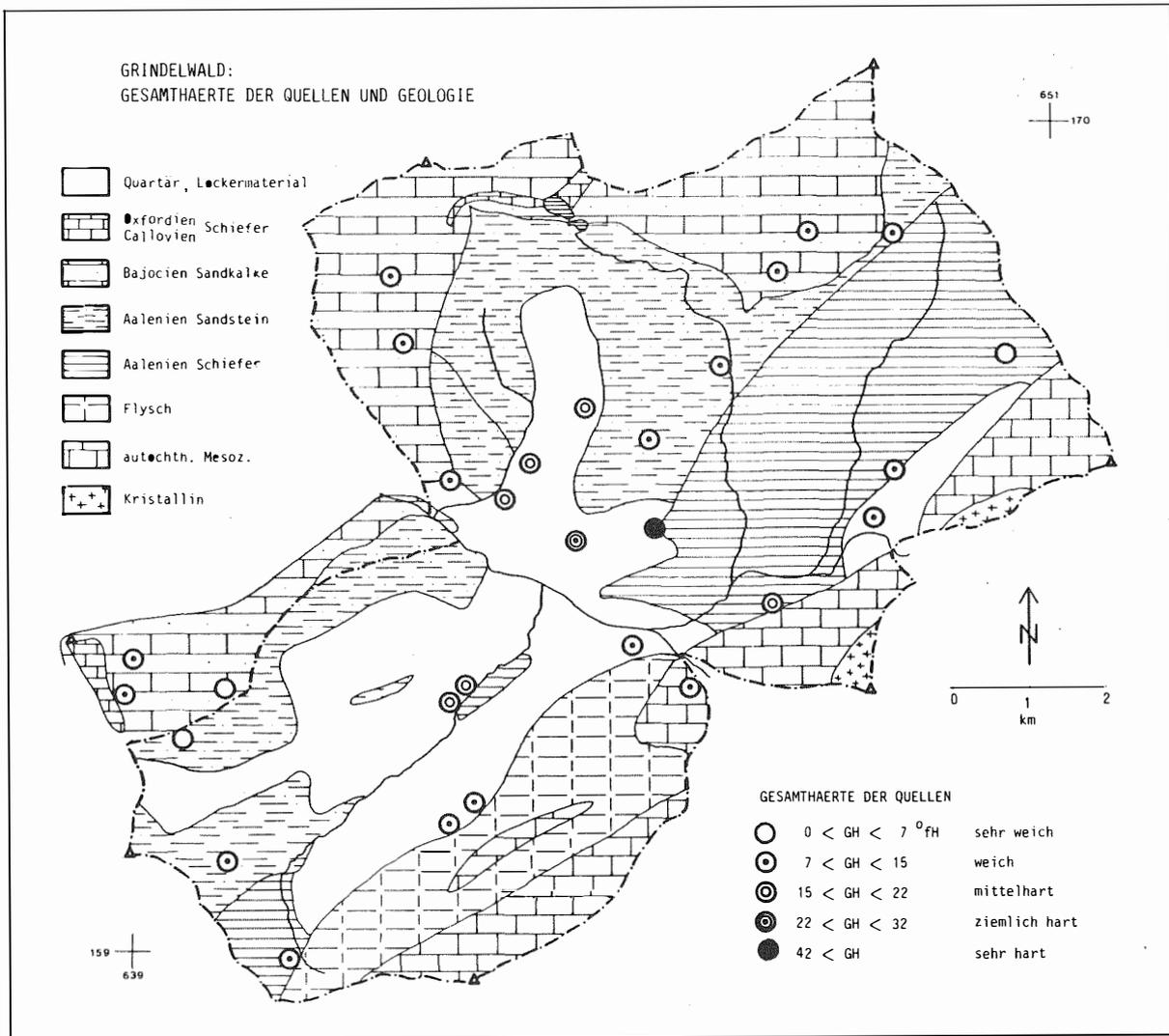


Abb. 19: Die Verteilung der Quellwasser-Gesamthärte auf den Hintergrund der geologischen Verhältnisse. Es besteht keine deutliche Abhängigkeit zwischen den beiden kartierten Phänomena.

Nach der in HOEGL (1980:78) angewendeten Klassifikation der Quellwässer (Komponenten-Konzentration >20 mval %), handelt es sich bei

Hubel, Tuft, Bachhalten um
Calcium-Magnesium/Hydrogenkarbonat-Sulfat-Quellen

Schattenhalb um eine
Calcium/Hydrogenkarbonat-Sulfat-Quelle und

Klecki und Hostenstein um
Calcium/Hydrogenkarbonat-Quellen.

Die übrigen Quellen liegen innerhalb dieses Klassifikations-Spektrums.

Zusammenfassend lässt sich folgendes über die Eigenschaften der Quellwässer und ihre Verteilung sagen:

- 1) Die Quellwässer Grindelwalds können alle als Calcium-(Magnesium)/Hydrogenkarbonat-(Sulfat)-Wässer bezeichnet werden, wobei die Mengen der gelösten Mineralien in einem Einzelfall (Quelle Hubel) knapp 1000 mg/l erreichen können.
- 2) Die am höchsten mineralisierten Quellwässer treten im zentralen Bereich der Doggermassen zutage. Sie fallen gegenüber den andern Quellen vor allem durch erhöhte Sulfatkonzentrationen auf.
- 3) In hohen Lagen am Rande des Talkessels können sehr weiche Wässer entspringen.
- 4) Wässer aus den Flyschserien am Rand des Autochthons zeigen ausserordentlich kleine Natriumkonzentrationen.
- 5) Ionen, die sonst in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten in problematischer Konzentration auftreten können (Nitrat, Chlorid, Phosphat), sind bis heute im

Untersuchungsgebiet nur in geringer und unbedeutender Konzentration festgestellt worden.

- 6) Es ist nicht möglich, aus den gelösten Inhaltsstoffen auf die Herkunft des Wassers innerhalb der Dogger-Serie zu schliessen und damit das Einzugsgebiet der Quellen abzugrenzen.
- 7) Es zeigen sich keine hinreichenden Unterschiede im Chemismus der Quellwässer, um daraus eine stichhaltige Raumgliederung zu begründen, die über das hinaus geht, was unter Punkt 2), 3) und 4) gesagt wird. Umgekehrt sind sich benachbarte Quellen oft ähnlich genug, um zu Quellgruppen mit gemeinsamen Eigenschaften zusammengefasst werden zu können.

Aus der Interpretation der Zusammensetzung von Quellwässern im Jahresverlauf können Hinweise auf das Verhalten und die Lage der entsprechenden Grundwasserreservoirs abgeleitet werden. Die Schneeschmelze bietet die Möglichkeit, die **Beeinflussung einer Quelle durch oberflächennahes (gütemässig gefährdetes) Wasser** abzuschätzen. Unter der Annahme, dass frisch infiltriertes Schmelzwasser deutlich langsamer aufmineralisiert wird als die unterirdische Fliesszeit dieser Komponente bis zur Quelle beträgt, kann aus dem Jahresgang der Leitfähigkeit der Anteil an relativ frischem Infiltrat an der Quellschüttung berechnet werden. In Abbildung 20 sind für die monatlich beprobten Quellen und das Grundwasser die Anteile von Reservoirwasser an der Gesamtschüttung für die Untersuchungsperiode aufgetragen. Der Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass in den Monaten Januar und Februar, wo Infiltration ausgeschlossen werden kann, nur hochmineralisiertes, altes Reservoirwasser geschüttet werde. Die Darstellung basiert auf den Mittelwerten der Leitfähigkeit dieser beiden Monate für Reservoirwasser. Für frisch infiltriertes Wasser haben wir eine Leitfähigkeit von $30 \mu\text{S}/\text{cm}$ angenommen, was jener von sommerlichem Schmelzwasser des Oberen Grindelwaldgletschers entspricht und auch den im Mittelland gemessenen Leitfähigkeiten des Niederschlags nahe-

kommt (WERNLI 1981). Die Messung der Leitfähigkeit von Niederschlagswasser, das im Sommer 1980 während eines längeren Regens in Grindelwald gesammelt wurde, ergab demgegenüber nur einen Wert von 13 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

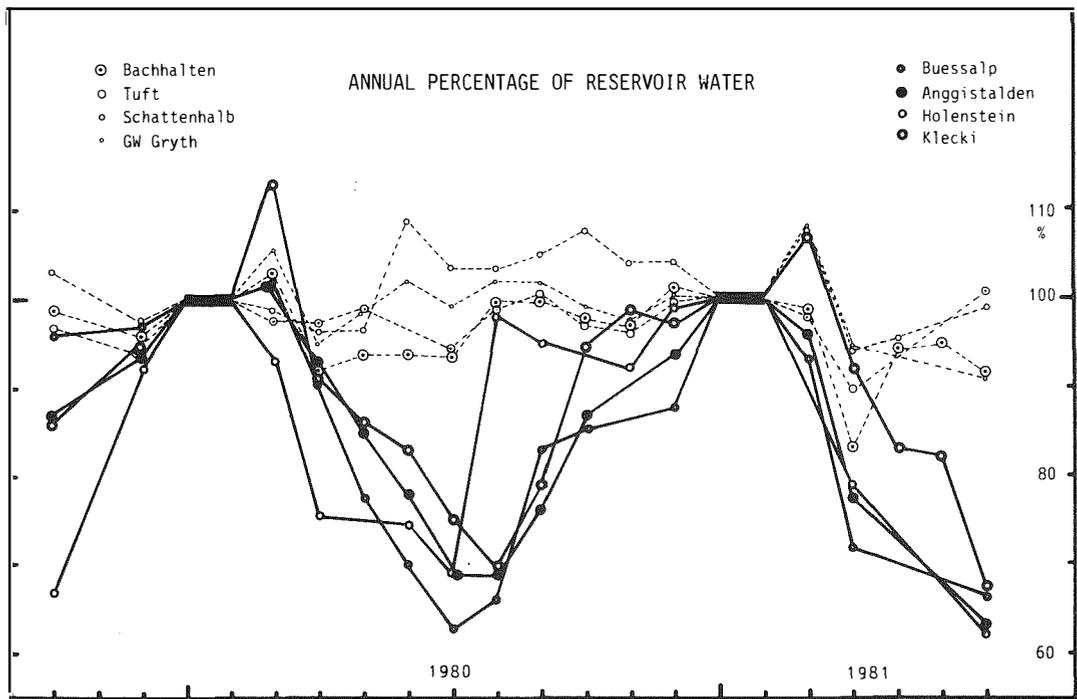


Abb. 20: Prozentualer Reservoirabfluss der Quellschüttung im Jahresverlauf. Unterbrochene Linien: oberflächenferne Quellen, ausgezogene Linien: oberflächennahe Quellen.

Aufgrund der im Jahresverlauf ändernden Reservoiranteile am Quellerguss können deutlich **zwei Gruppen von Quellen** unterschieden werden:

- **Oberflächenferne Quellen** mit nur geringem Einfluss des Schneeschmelzwassers auf die chemische Zusammensetzung und die Quellschüttung (Schattenhalb) oder mit grosser Schüttungszunahme während der Schneeschmelze (Tuft, Bachhalten) bzw. mit grossem Anstieg des Grundwasserstandes (GW Gryth), bei geringer Aenderung des hydrochemischen Status.

- Oberflächennahe Quellen, die deutlich auf das Eindringen von frischem, wenig mineralisiertem Schmelzwasser reagieren (Buessalp, Anggistalden, Holenstein, Klecki).

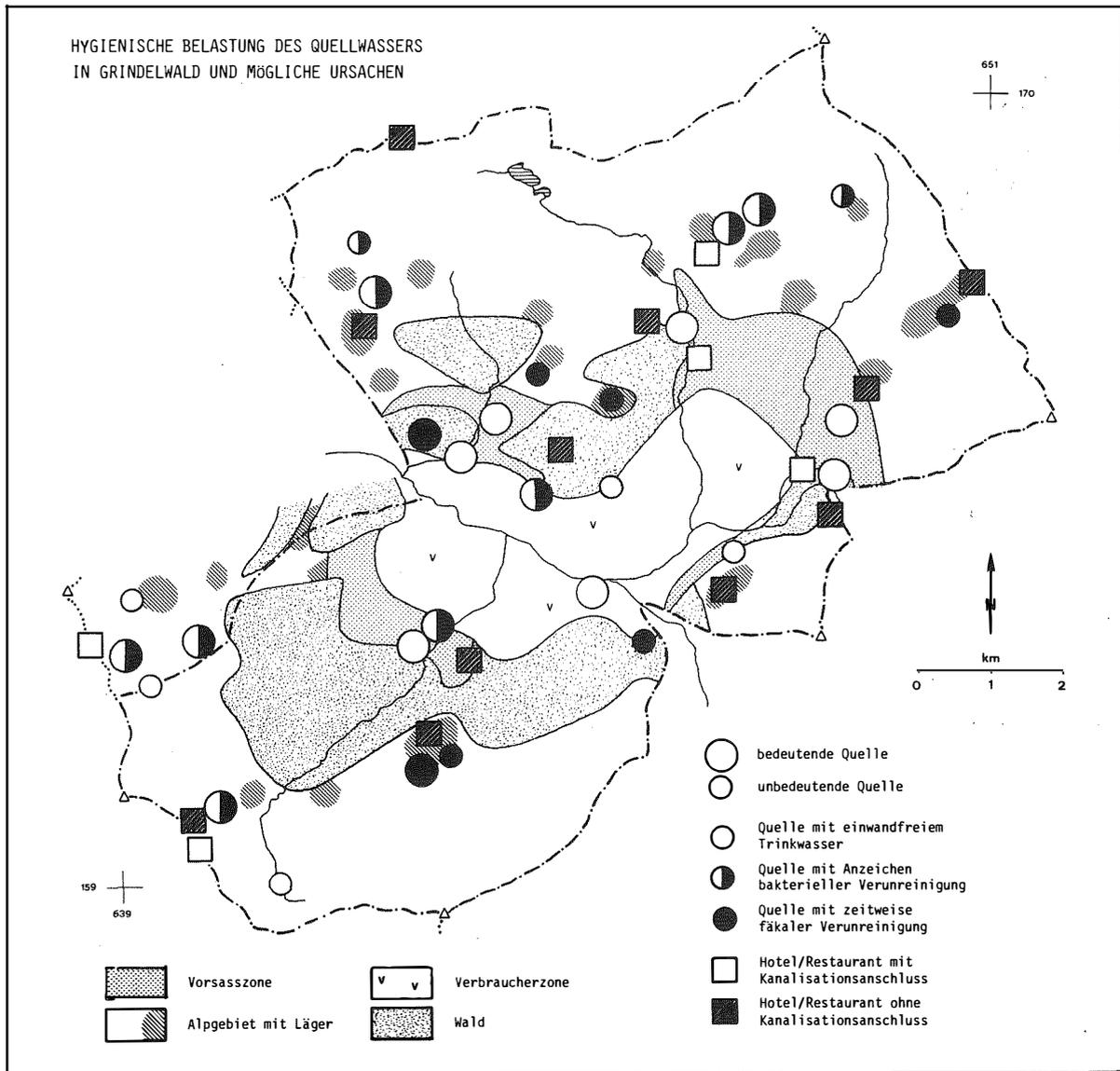


Abb. 21: Die hygienische Belastung der Quellwasser im Untersuchungsgebiet Grindelwald und deren mögliche Ursachen.

Obschon nur monatliche Beprobungen vorgenommen werden konnten und damit Feinheiten im Reagieren der Quellwasserbeschaffenheit auf einzelne Inputschübe nicht erfasst werden

können, lassen sich doch wichtige Aussagen über das Reservoirverhalten der einzelnen Quellen machen.

Um die Quellen Grindelwalds in bakteriologisch-hygienischer Hinsicht charakterisieren zu können, wurden während der drei Gesamtbeprobungskampagnen vom Oktober 1979, Juli 1980 und Juli 1981 an allen besuchten Quellen Wasserproben direkt an der Quelfassung abgefüllt und noch gleichentags im Kantonalen Labor bakteriologisch untersucht. Etwa monatlich werden zudem von einem Beauftragten der Gemeinde dem Versorgungsnetz routinemässig Proben zur hygienischen Ueberwachung der Wasserqualität entnommen und ebenfalls durch das Kantonale Labor analysiert.

Da primär nicht die Qualität des Wassers interessiert, das über das Versorgungsnetz an die Wasserbezüger abgegeben wird, sondern die Qualität des Quellwassers an sich, beziehen wir uns auf die von uns am Quellaustritt entnommenen Wasserproben. Zur Absicherung der Resultate wurden jeweils Doppelproben entnommen.

Nur wenige der beprobten Quellen zeigen während allen drei Beprobungsterminen hygienisch unbedenkliche Wasserqualität. Auch die grossen Gemeindequellen weisen mindestens in einer Probe erhöhte Keimzahlen auf. Es muss somit zeitweise ein Anteil oberflächenbeeinflusstes Wasser an der Schüttung beteiligt sein. Das vereinzelte Auftreten von Coli-Bakterien in Quellen der Gemeindewasserversorgung oder privater Versorgungsgenossenschaften muss als Warnung aufgefasst werden. Die klassierte Beurteilung der Quellen und die möglichen Ursachen sind in Abbildung 21 räumlich dargestellt.

c) Isotopenhydrologische Untersuchungen

Durch die isotopenhydrologischen Analysen auf Tritium und Sauerstoff O-18 sollten Angaben über das Wasseralter und die Höhenlage der Quelleinzugsgebiete erhalten werden (SCHOTTERER, FELBER, LEIBUNDGUT 1982). Aus technischen Gründen haben nur 1 bis 2 Proben pro Monat und Quelle entnommen und analysiert werden können.

Die mittleren Tritium-Konzentrationen der einzelnen Quellwässer sind verschieden. Sie entsprechen nicht den Inputkonzentrationen. Auch die Aktivitätsabnahmen über die Zeit verlaufen in den einzelnen Quellen unterschiedlich (Abb. 22). Diese Differenzen im Verhalten der Quellen lassen auf individuelle Reservoirsysteme schliessen. Die Aufenthaltszeit des Wassers muss dabei mindestens ein bis zwei Jahre betragen, da keine saisonalen Inputschwankungen auftreten. Zur Berechnung der Wasseralter aus der zeitlichen Abnahme der Tritiumaktivität wurde das Exponentialmodell nach OESCHGER und SIEGENTHALER (1972) angewendet, das in der Quellschüttung stets eine für das unterirdische Reservoir repräsentative Altersmischung annimmt.

Aufgrund der Modellvorstellung lässt sich die hypothetische zeitliche Abnahme der Tritiumkonzentration berechnen. Sie ist für verschiedene mittlere Wasseralter berechnet, für die gezeigten Quellen und das Grundwasser sind die effektiven Regressionsgeraden der Tritiumabnahme eingezeichnet (vgl. Abb. 22). Aus dem Vergleich beider Darstellungen kann die mittlere Verweilzeit des Quellwassers im Reservoir abgeschätzt werden.

Für die vier Quellen, von denen das mittlere Alter des geschütteten Wassers bekannt ist, lassen sich die zur Speicherung und Alterung des Quellwassers nötigen Reservoirkubaturen berechnen. Dazu muss die mittlere jährliche Schüttung der Quelle mit dem mittleren Alter des Wassers multipliziert werden. Die berechneten Reservoirgrößen sind in der Tabelle 13 zusammengestellt.

Tab. 13: Resultate der isopenhydrologischen Untersuchungen der Hauptquellen im Untersuchungsgebiet Grindelwald.

QUELLE Höhe über Meer	SCHÜETZUNG (m ³ /Min.) Min. - Max. Mittel	DURCHSCHNITTLICHES ALTER (Jahre)	BERECHNETES RESERVOIRVOLUMEN (10 ⁶ m ³)	MITTLERES EIN- ZUGSGEBIET (müM.)	BEMERKUNGEN
KLECKI 1360 m	0.5 - 20 6.3	~ 45	149	~ 2000	Aendernde chemische Zusammensetzung. Frischwassereinfluss sehr gering. Speicherung im Gletscher und Zwischenreservoir.
TUFT 1100 m	~1 - 8 5	~ 4	10.5	≥ 1400	Bezugspunkt für δ ¹⁸ O-Höhe-Beziehung. Annähernd konstante chem. Zusammensetzung mit leichtem Frischwassereinfluss.
BACHHALTEN 1300 m	0 - 3 0.8	~ 2	0.8	~ 1950	Annähernd konstante chem. Beschaffenheit. Kein deutlicher Schmelzwassereinfluss: gut durchmischtes Reservoir.
SCHATTENHALB 1200 m	0.3	3 - 4	0.55	~ 1600	Annähernd konstante chem. Beschaffenheit. Kein Schmelzwassereinfluss. Deutliche Temperaturschwankungen (See-Einfluss).
GRYTH 960 m	Grundwasser	~ 3	/	~ 1900	Hohes Einzugsgebiet (am Mittellegigrat). Infiltration durch Lütschine bei Schneeschmelze möglich.

Durch die Isotopenuntersuchungen konnte auch der in der Wasserbilanz des hydrologischen Untersuchungsgebietes ersichene Fremdwasserzutritt bestätigt werden. Wenn die doch wahrscheinlich realistische Schätzung zutrifft, dass mindestens 50 % des durch die Quelle Klecki geschütteten Wassers von ausserhalb des morphologischen Einzugsgebietes kommt, kann mit dieser Quelle allein rund die Hälfte des in der Wasserbilanz festgestellten Fehlbetrages, der als Fremdwasserzutritte interpretiert wurde, erklärt werden. Weitere Fremdwasserzutritte am Fusse des Mettenberges oder des Eigens sind wahrscheinlich, auch wenn sie durch unsere Untersuchungen nicht erfasst worden sind.

In den folgenden Teilkapiteln sind die spezifischen Quelldaten und Erkenntnisse aus der Entschlüsselung der am Quell-

mund gewonnenen Daten für die wichtigen Quellen im Raume Grindelwald zusammengestellt.

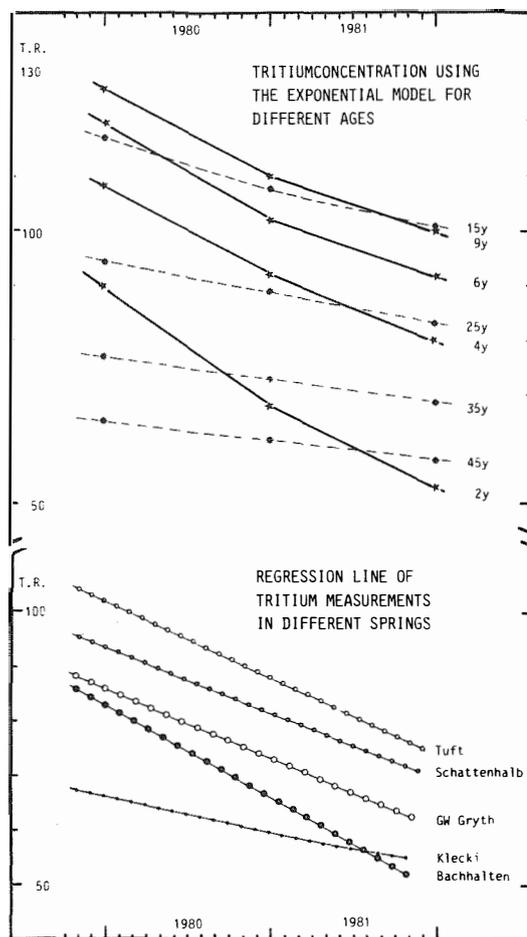


Abb. 22: Tritium-Modelle und Tritiumgehalte (Regressionsgeraden) von Quellen im Untersuchungsgebiet Grindelwald.

Zur Raumbewertung in den Einzugsgebieten der Quellen wurden die Eigenschaften des Aquifers, des Wassers und der Landnutzung bewertet. Als Bewertungsgrößen wurden Durchlässigkeit, Filterkapazität, mittlere Aufenthaltszeit, Infiltrationsmenge und der Einfluss der Landnutzung auf die chemische und bakteriologische Wasserbeschaffenheit herangezogen. Diese Eigenschaften wurden in einer fünfstufigen Bewertungsskala beurteilt. Die Schlüsseltabelle (Tab. 14) zeigt den Bewer-

tungsvorgang. Pro Teilraum können minimal 7 und maximal 35 Punkte erreicht werden. Der gemittelte Wert von 1 bis 5 wird in 5 Klassen von sehr klein bis sehr gross eingeteilt. Damit wird die potentielle Gefährdung in jedem Teilraum beschrieben. In der gleichen Tabelle wird auch die szenierte potentielle Gefährdung ausgewiesen.

Tab. 14: Schlüsseltabelle zur Raumbeurteilung der Quellen-Einzugsgebiete. In der ersten Spalte ist ein Beispiel angeführt.

Bewertungsteile	Teilraum A	Teilraum B	Teilraum C	Teilraum D		
Aquifer	Moräne					
Wassertyp	Porengrundwasser-aquifer					
Aktuelle Landnutzung	Siedlung					
<u>Bewertungsgrößen</u>		<u>5</u>	<u>4</u>	<u>3</u>	<u>2</u>	<u>1</u>
Durchlässigkeit	3 / 3	s. hohe	hohe	mittlere	geringe	s. geringe
Filterkapazität	3 / 3	s. kleine	kleine	mittlere	hohe	s. hohe
mittlere Aufenthaltszeit	5 / 5	s. kurz	kurz	mittel	lang	s. lang
Infiltrationsmenge	3 / 3	s. hoch	hoch	mittel	niedrig	s. niedrig
Einfluss auf Infiltrationsrate	4 / 4	sehr ungünstig	un-günstig	in-different	günstig	s. günstig
Einfluss auf chemische Wasserbeschaffenheit	4 / 5	sehr ungünstig	un-günstig	in-different	günstig	s. günstig
Einfluss auf bakteriologische Wasserbeschaffenheit	5 / 5	sehr ungünstig	un-günstig	in-different	günstig	s. günstig
Bewertungsklasse	27 / 28 3.86 / 4.0	5.0-4.2	4.19-3.4	3.39-2.6	2.59-1.8	1.79-1.0
potentielle Gefährdung	gross	s. gross	gross	mittel	klein	s. klein
szenierte potentielle Gefährdung	gross	s. gross	gross	mittel	klein	s. klein

6.3.2 Detailanalyse der Kleckiquelle nach dem Konvergenzansatz

Die Kleckiquelle liegt am Fusse der Wetterhornwand in der Vorsasszone an der Grenze der Aalénienschiefer zu den quar-
tären Lockermassen. Die Schüttungskurve bis etwa Mitte Juni
ist ungefähr parallel zur Lufttemperaturkurve, indem jedem
grösseren relativen Temperaturmaximum auch ein Schüttungs-
maximum entspricht. Dabei scheint die Reaktionszeit auf ver-
mehrten Schmelzwasserinput im Laufe der Schmelzperiode von
etwa vier auf einen Tag abzunehmen, was damit erklärt werden
kann, dass mit zunehmender Reservoirfüllung die Wasserwege

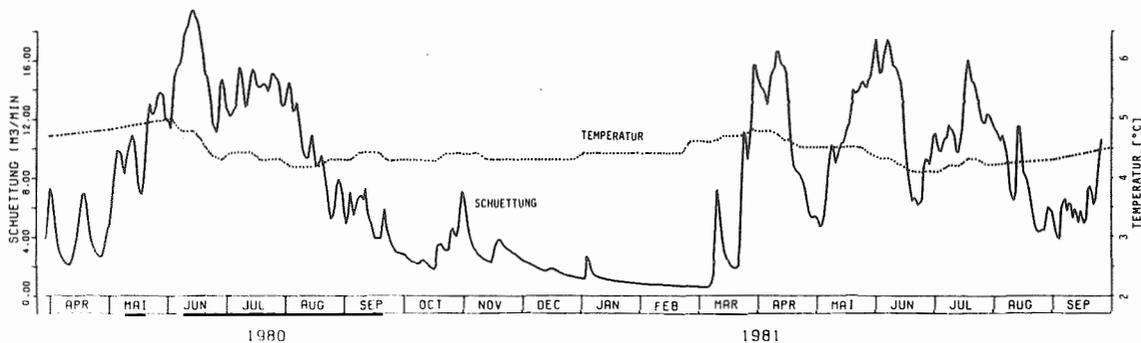


Abb. 23: Ganglinien der Quellschüttung und der Wassertemperatur der Kleckiquelle in Grindelwald. Tagesmittel vom März 1980 bis September 1981. Fläche: 6,620 Km². Quellaustritt: 1360 m.ü.M.

im vadosen Bereich bis zum Erreichen der phreatischen Zone immer kürzer werden und deshalb die Ansprechzeit der Quellen abnimmt. Während Schönwetterperioden im Sommer macht sich ein Tagesgang der Schüttung bemerkbar (Abb. 23), der mit Unterbrüchen bis Ende September anhalten kann, was auf die Speisung durch Schnee- oder Eiswasser schliessen lässt. Nach der Zeit der grössten Infiltrationsrate etwa Mitte Juni rea-

giert Klecki zunehmend auch auf Niederschlagsinput und nicht mehr nur auf den Temperatureinfluss.

Die Kleckiquelle schüttet weiches Wasser mit entsprechend geringen Konzentrationen der einzelnen Wasserinhaltsstoffe. Diese schwanken im Jahresverlauf, gemessen an den starken Schüttungsschwankungen nur wenig. Die Schneeschmelze führt jeweils zu noch etwas tieferen Konzentrationen (Abb. 24). Die aufgeführten Monatswerte der Hauptkomponenten Natrium, Sulfat, Gesamt- und Karbonathärte verlaufen praktisch parallel, wobei der Sulfatgehalt grösseren Streuungen unterworfen ist. Anthropogene Verschmutzungsindikatoren wie NO_3^- , PO_4^- oder NH_4^- - Gehalte sind nicht nachweisbar.

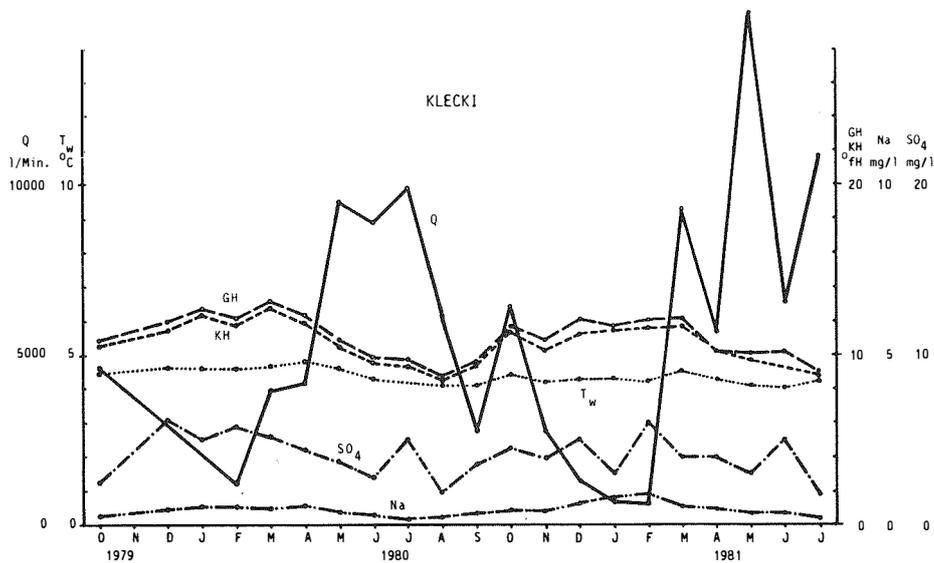


Abb. 24: Wasserbeschaffenheit der Kleckiquelle. Ganglinien der Monatsmittel der Parameter Quellschüttung (Q), Wassertemperatur (T_w), Gesamthärte (GH), Karbonathärte (KH), Sulfat (SO_4) und Natrium (Na).

Die raschen und starken Schüttungsänderungen bei Schmelzwassereinfluss und die hohe sommerliche Schüttungsmenge lassen grosslumige, gut ausgebildete unterirdische Wasserwege mit nur beschränkter Filterwirkung annehmen. Die deutliche Abhängigkeit des sommerlichen Schüttungsganges von der Lufttemperatur, sowie die tiefe, im Jahresgang nur wenig schwan-

kende Wassertemperatur weisen auf einen grossen Schnee- und Eisspeicher hin. Dies wird auch durch die geringe Leitfähigkeit belegt. Deren Gang weist auf die im Jahresverlauf ändernde mittlere Aufenthaltsdauer des Wassers im unterirdischen Reservoir durch wechselnde Speisung aus den verschiedenen Teilräumen hin.

Mit dem kleinsten δ O-18-Wert der vier beschriebenen Quellen ergibt sich für die am Fusse des Wetterhorns gelegene Quelle das höchste Einzugsgebiet von im Mittel 2000 m ü.M. Das sehr hohe mittlere Wasseralter von 45 Jahren erkennt man aus den geringen und relativ wenig abfallenden Tritiumkonzentrationen (vgl. Abb. 22). Die Mineralisation des Quellwassers ist einem deutlichen jahreszeitlichen Gang unterworfen (vgl. Abb. 23 und 24) und dokumentiert damit eine wechselnde Aufenthaltszeit im unterirdischen Reservoir. Daraus muss geschlossen werden, dass das Wasser vor dem Durchlaufen des unterirdischen Reservoirs vorgealtert ist, was in der Gröszenordnung von 45 Jahren nur im Gletschereis geschehen kann. Dafür sprechen auch die relativ geringe Leitfähigkeit und die ganzjährig tiefe Temperatur des Quellwassers. Die wenig schwankenden Tritiumwerte lassen einen wesentlichen Einfluss von jungem Niederschlagswasser ausschliessen. Ein Einfluss kann jedoch infolge der heute ähnlichen Tritiumwerte von altem und rezemtem Wasser (vgl. Abb. 22) nicht ganz ausgeschlossen werden.

Aufgrund dieser Resultate kann ein Funktionsmodell formuliert werden, in dem die hydrologischen Messergebnisse mit der räumlichen Ausstattung des Einzugsgebietes in Einklang gebracht werden können. Gleichzeitig kann das Einzugsgebiet relativ genau aufgegliedert werden.

Zusammengefasst ergaben die hydrologischen Messungen grosse kurzfristige und auch jährliche Schwankungen der Schüttung und der Mineralisation, bei gleichzeitig stabiler Wasserbeschaffenheit und einem sehr hohen mittleren Alter von 45 Jahren. Zur Erklärung dieser gegensätzlichen Ergebnisse kann nur ein Zwei- oder sogar ein Mehr-Komponentenmodell in Fra-

ge kommen. Die Raumbewertung des möglichen Einzugsgebietes zeigt denn auch ein Gletscher-, ein Karst- und ein Porengrundwassergebiet. Es sind dies drei grundsätzlich verschiedene Teilräume mit jeweils typischen Speicher- und Entwässerungseigenschaften. Die Gesamtheit der Resultate führte zur Modellvorstellung, wie sie in Abbildung 25 dargestellt ist.

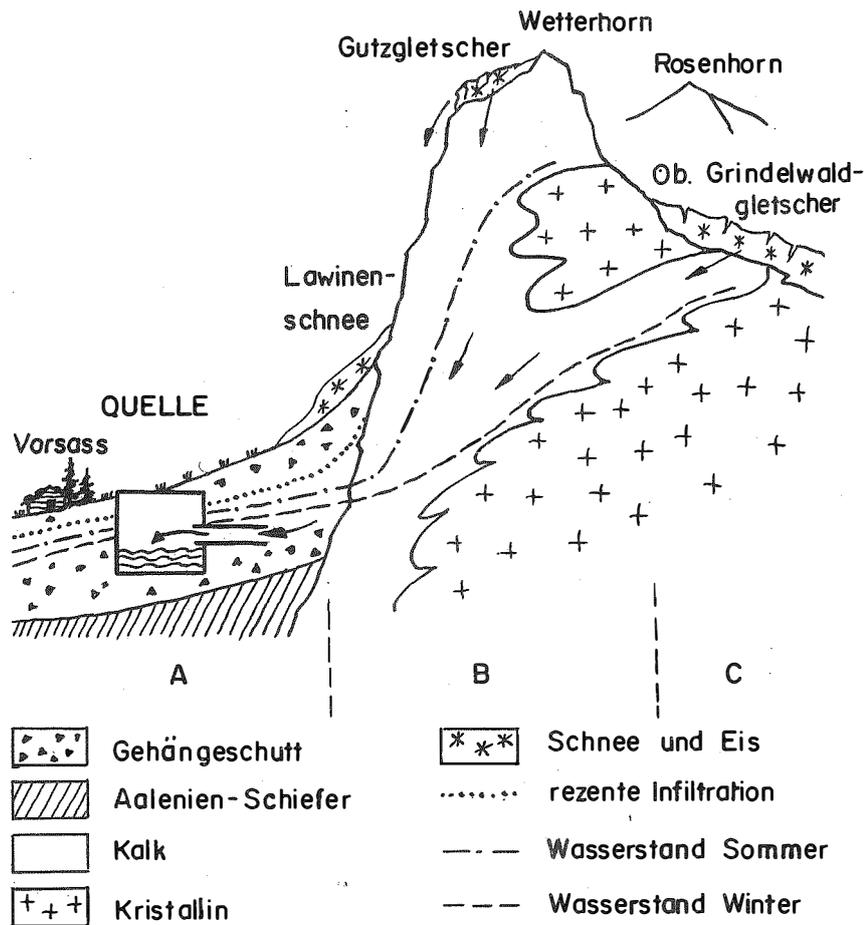


Abb. 25: Hydroökologisches Funktionsmodell der Kleckiquelle. A, B, C sind Teilräume mit unterschiedlichem hydrologischen Verhalten und verschiedener Landnutzung.

Als Lieferant von altem Wasser kommen innerhalb des morphologischen Einzugsgebietes der an der Westflanke des Wetterhorns hängende Gutzgletscher und seine Abbruchmassen am Fusse der Felswand in Betracht. Dafür spricht, dass bei warmem,

niederschlagsfreiem Sommerwetter sowohl der Gletscher selbst als auch die Lawinenkegel keinen sichtbaren oberirdischen Schmelzwasserabfluss aufweisen. Das Volumen des als Eis und Schnee zur Verfügung stehenden Wassers beträgt jedoch nur ungefähr $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, was lediglich etwa den zehnten Teil des zur Alterung und Speisung der Klecki-Quelle notwendigen Reservoirgrösse ausmacht (vgl. Tab. 9). Aus dieser Tatsache folgt, dass an der Speisung der Kleckiquelle hauptsächlich Gletschereis ausserhalb des topographischen Einzugsgebietes beteiligt sein muss. Ein Reservoir, das auch in der Höhenlage den Vorstellungen aus dem $\delta\text{O}-18$ -Gehalt des Klecki-Wassers entspricht, stellt der Obere Grindelwaldgletscher dar. Dieser muss durch Kluft- und Karstwassersysteme Schmelzwasser verlieren, das am Fusse der Wetterhornkalkwand, die oberflächlich Verkarstungserscheinungen zeigt, in die quartären Schuttmassen austritt und hier in der Klecki aber wahrscheinlich auch in andern Quellen (z.B. Gletschersand) wieder erscheint. Da der Hauptstrang der Fassung Klecki in über 8 m Tiefe angelegt ist (RYSER AG 1967), zeigt die Quelle keinen Einfluss des gemäss unseren Modellvorstellungen über dem Karstwasser abfliessenden jüngeren Infiltrats. Die jahreszeitlichen Schwankungen der Leitfähigkeit werden durch die unterirdische Aufenthaltsdauer des im Gletscher gealterten Karstwassers bestimmt und zeigen daher den für Karstquellen typischen Gang mit piston-flow-Effekt im Frühling, wenn bei erhöhtem Wassernachschub zuerst Wasser mit längerer unterirdischer Aufenthaltszeit ausgestossen wird. Aber auch Niederschläge und Schneeschmelze in der Umgebung der Quelle vermögen offenbar den hydrostatischen Druck im Grundwasserleiter zu erhöhen, so dass die Schüttung auch auf solche Ereignisse reagiert, ohne dass allerdings Frischwasser ausgepresst wird. Auch am Mettenberg sind Karstwasseraustritte bekannt, so z.B. der "Chessibach" (ca. 647'200/162'200), der nach Aussage Einheimischer sich etwa acht Stunden nach starken Gewitterregen wahrscheinlich als Ueberlaufquelle aus einer Höhle über eine Felswand ergiesst.

Da der Wasserspiegel des Grundwassers im Fassungsbereich nicht so tief fällt, dass (kontaminiertes) Wasser aus dem Teilraum A in die Quelle gelangen kann, bleibt die Qualität stabil. Hydraulisch wirken aber die Grundwasserspiegelschwankungen auf die Quelle (Schüttungsschwankungen).

Je nach Jahreszeit und Schmelzwasseranfall herrscht im Karstsystem ein geringer Druck, was zu längerer unterirdischer Verweilzeit des Wassers führt (erhöhte Leitfähigkeit bei kleiner Schüttung im Winter) oder ein sehr hoher hydrostatischer Druck mit entsprechend rascherem Durchfliessen der Wasserbahnen im Sommer. Nach dem Verlassen des Karstsystems bilden die der Wetterhornwand vorgelagerten, vermutlich geschichteten Schuttmassen den Aquifer, der gegen unten durch die Aalénienschiefer abgedichtet ist. Das kalte Karstwasser wird an der Fusszone des Wetterhorns von jungem Infiltrat (Schneesmelze, Niederschläge) überlagert. Die Fassungsstränge der Quelle reichen ganzjährig, also auch im Hochwinter bei tiefem Wasserstand im Aquifer, in die mit Gletscherwasser gesättigte Zone und schütten deshalb altes Wasser ohne Anzeichen einer Verdünnung durch junges Schmelz- oder Niederschlagswasser.

Das Dargebot der Kleckiquelle ist mit einer mittleren Schüttung von 6300 l/min ausserordentlich hoch. Es ist die ertragreichste Quelle im Untersuchungsraum. Die chemische Wasserbeschaffenheit ist sehr gut, in bakterio-logischer Hinsicht besteht eine leichte Beeinträchtigung. Die Varianz der Schüttung ist mit einem Schwankungskoeffizienten (SK) von 33 im mittleren Bereich. Die aktuelle Belastung der Quelle aufgrund der hydrologischen Statusaufnahme ist sehr klein. Sowohl die Grundwasserneubildung wie auch das Speichervermögen sind ungestört.

Nach der Raumbewertung besteht in Teilraum A eine grosse, in den Teilräumen B und C eine kleine potentielle Gefährdung (Tab. 15).

Die potentielle Gefährdung drückt sich nicht in einer entsprechenden aktuellen Belastung der Quelle aus. Nur die Resultate der bakteriologischen Untersuchungen weisen auf eine gewisse Sensibilität des Quellsystems hin. Daraus kann geschlossen werden, dass das Hydrosystem der Kleckiquelle gesamthaft eine sehr hohe Persistenz aufweist.

Tab. 15: Raumbewertung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Kleckiquelle (vgl. Tab. 14, Abb. 25).

	Teilraum A	Teilraum B	Teilraum C
Aquifer	Gehängeschutt	Kalkfels	Gletschereis
Art des Wassers	Porengrundwasser	Karst-/Kluftwasser	Gletscherwasser
Aktuelle Landnutzung	Mähweide	ungenutzt (Klettersport)	ungenutzt
Durchlässigkeit	3 / 3	4 / 4	5 / 5
Filterkraft	3 / 3	4 / 4	4 / 4
Speicherung	5 / 5	3 / 3	1 / 1
Speisung	3 / 3	2 / 2	2 / 2
Einfluss auf Infiltrationsrate	4 / 4	1 / 1	1 / 1
Einfluss auf chemische Wasserbeschaffenheit	4 / 5	1 / 4	1 / 3
Einfluss auf hygienische Wasserbeschaffenheit	5 / 5	2 / 5	1 / 5
	27 / 28	17 / 23	15 / 21
	3.86 / 4.0	2.43 / 3.29	2.14 / 3.0
potentielle Gefährdung	gross	klein	klein
szenierte potentielle Gefährdung	gross	mittel	mittel

Die Projekt-Fragestellung verlangt ausdrücklich auch eine verbindliche Prognose bei Aenderung der Landnutzung. Diese Aenderungen werden in sogenannten Nutzungsvarianten vorgege-

ben. Als Szenarium nehmen wir hier den Fall der Intensivierung der Landnutzung (landwirtschaftlich und touristisch) an. Die Raumbeurteilung kann über die Bewertung der hydrologisch wirksamen Faktoren bezüglich der potentiellen Belastung zur Vorstellung der Gefährdung der Quelle bei Nutzungsänderungen führen.

Unter gleichbleibenden naturräumlichen Gegebenheiten erhöht sich die **szenierte potentielle Gefährdung** um je eine Stufe. Diese fällt für die einzelnen Teilräume der Kleckiquelle unterschiedlich aus. Die gütemässige Belastbarkeit der Teilräume B und C ist klein bis mittel. Eine denkbare touristische Nutzung müsste aufgrund der Speisungsmechanismen auf die Quellen wirken. Da auch bei einer Intensivierung der Nutzung des Teilraumes A eine Abnahme der Speisungsmengen aus den Teilräumen B und C nicht zu erwarten ist, ist jedoch die Belastbarkeit des Teilraumes A gross.

Unter Berücksichtigung des Quellenmodells ist ersichtlich, dass auch eine starke Intensivierung der landwirtschaftlichen Aktivität und damit eine zunehmende Gefährdung des Grundwassers im Teilraum A noch zu keiner Belastung führen wird, da das Infiltrat aus diesem Raum über die Fassung wegströmen wird, ohne die Qualität des gefassten Quellwassers zu beeinträchtigen. Eine punktuelle Verunreinigungsquelle in Zone B und/oder C (z.B. Berghaus) würde sich je nach Art, Intensität und vor allem Ort mittel- bis langfristig auf die Qualität des Quellwassers von Klecki auswirken. In der Region der Hochalpen und des Gletschers ist allerdings kaum mit einer gesteigerten Nutzung zu rechnen.

Die Persistenz des Quellsystems ist vom Teilraum A her damit sehr hoch. Der Gletscher als Wasserlieferant sichert eine ausreichende Zufuhr von qualitativ gutem Wasser für lange Zeit. Da ohne Klimaschwankungen mit gesättigten Verhältnissen im Aquifer der Zone A gerechnet werden kann, ist mit gewissen Einschränkungen auch die gute Qualität des Quellwassers sichergestellt. Hingegen ist im Teilraum B bei zukünftigen Planungen die geringe Persistenz zu beachten.

Damit kann das hydrologische Gesamtpotential der Kleckiquelle unter Einbezug der Varianz und der Persistenz beurteilt werden. Das ausserordentlich hohe mengenmässige Potential wird durch die Varianz der Schüttung stark, durch die Persistenz nicht eingeschränkt. Die errechnete Versorgungskapazität der Quelle beträgt rund 58'000 Einwohner im Sommer gegenüber rund 1'800 Einwohnern im Winter. Die künstlichen Reservoir-Infrastrukturen sind nicht berücksichtigt.

6.3.3 Detailanalyse der Tuftquelle nach dem Konvergenzansatz

Die Quelle entspringt am oberen westlichen Dorfrand. Sie wurde wegen ihres Wasserreichtums und ihrer zur Dorfversorgung günstigen Lage bereits bei der Gründung der öffentlichen Wasserversorgung 1894 als erste Quelle gefasst (BAUMANN 1981).

Die ziemlich hohe Härte und die recht konstante chemische Zusammensetzung dieses Wassers lassen ein tief gelegenes, grosses Reservoir annehmen (Abb. 26). Dafür spricht auch die konstante, vergleichsweise hohe Wassertemperatur und der erhöhte Sulfatgehalt. Es ist anzunehmen, dass das Quellwasser

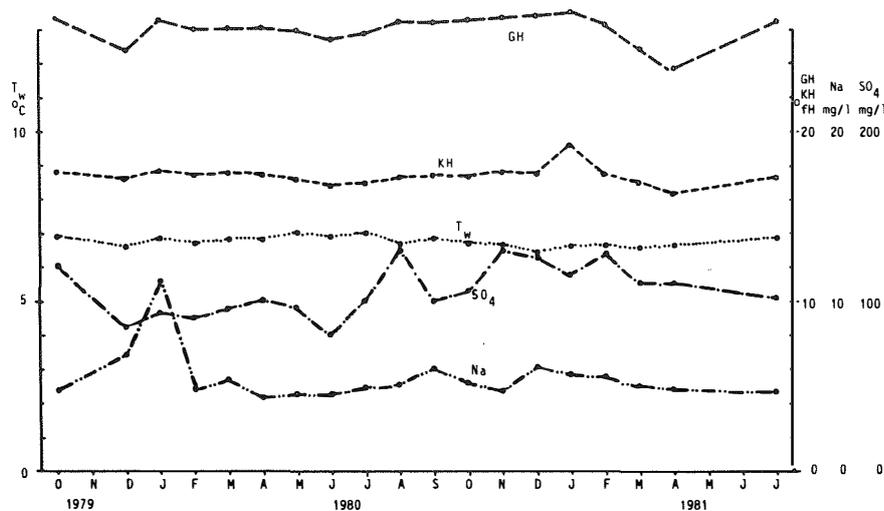


Abb. 26: Wasserbeschaffenheit der Tuftquelle. Ganglinien der Monatsmittel der Parameter Wassertemperatur (T_w), Gesamthärte (GH), Karbonathärte (KH), Sulfat (SO_4) und Natrium (Na).

oder Teile davon tiefere, im Liegenden des Doggers vermutete triadische Sedimente durchströmt. Die leicht verminderte Leitfähigkeit während der Schneeschmelze muss auf frischere Wasserbeimengungen zurückgeführt werden.

Die Abnahme der Tritiumaktivität lässt auf ein durchschnittliches Alter des Quellwassers von etwa 4 Jahren schliessen. In beiden Untersuchungsjahren zeigten sich zur Zeit der Schneeschmelze leicht erhöhte Tritium-Konzentrationen zur Höhenlage des Wasseraustritts (März). Daraus kann auf das Eindringen von frischem Schmelzwasser in Quellnähe geschlossen werden. Dies mag der Grund für die zeitweise unbefriedigende hygienische Qualität des Quellwassers sein. Die mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes wurde, zur Kalibrierung der Meereshöhe-Beziehung, zu rund 1400 m festgesetzt (untere Grenze). Das Einzugsgebiet dürfte somit hauptsächlich im Wald oberhalb des Dorfes und im Gebiet der Alp Nothalten zu suchen sein. Das hydrogeologische Hauptmerkmal im Einzugsgebiet der Quelle ist der als Speicherstein wirkende Aalénien-Eisensandstein mit eingefaltetem Bajocien-Sandkalk. Von Süden her sind gegen Westen auskeilende Aalénien-Schiefer diskordant darüber aufgeschoben (GUENZLER-SEIFFERT, WYSS 1938:36). Den Hangfuss im Südwesten bildet vor allem Bergsturz und Moränenmaterial, das z.T. auch den abtauchenden Aalénien-Schiefern überlagert ist.

Nach der Modellvorstellung versickert das Meteorwasser in den tektonisch stark zerklüfteten und zerspaltenen Aalénien-Sandsteinen und den Sandkalken des Bajocien. Es wird hier durch den wasserstauenden Schiefer über längere Zeit gespeichert und tritt da, wo die Falten durch das Lüttschinental durchbrochen sind, aus dem angelagerten Schuttmaterial aus (Abb. 27).

Das Dargebot (wasserhaushaltliches Potential) der Tuftquelle beträgt rund 5000 l/min an gutem Wasser bezüglich der chemischen Beschaffenheit und leichter Beeinträchtigung in hygienischer Hinsicht (erhöhte Keim- und Ammoniumgehalte). Die Varianz der Schüttung ist mit einem Schwankungskoeffizienten von <10 bei einem mittleren Alter von 4 Jahren klein. Die aktuelle Belastung der Quelle aufgrund der hydrologischen Statusaufnahmen ist klein.

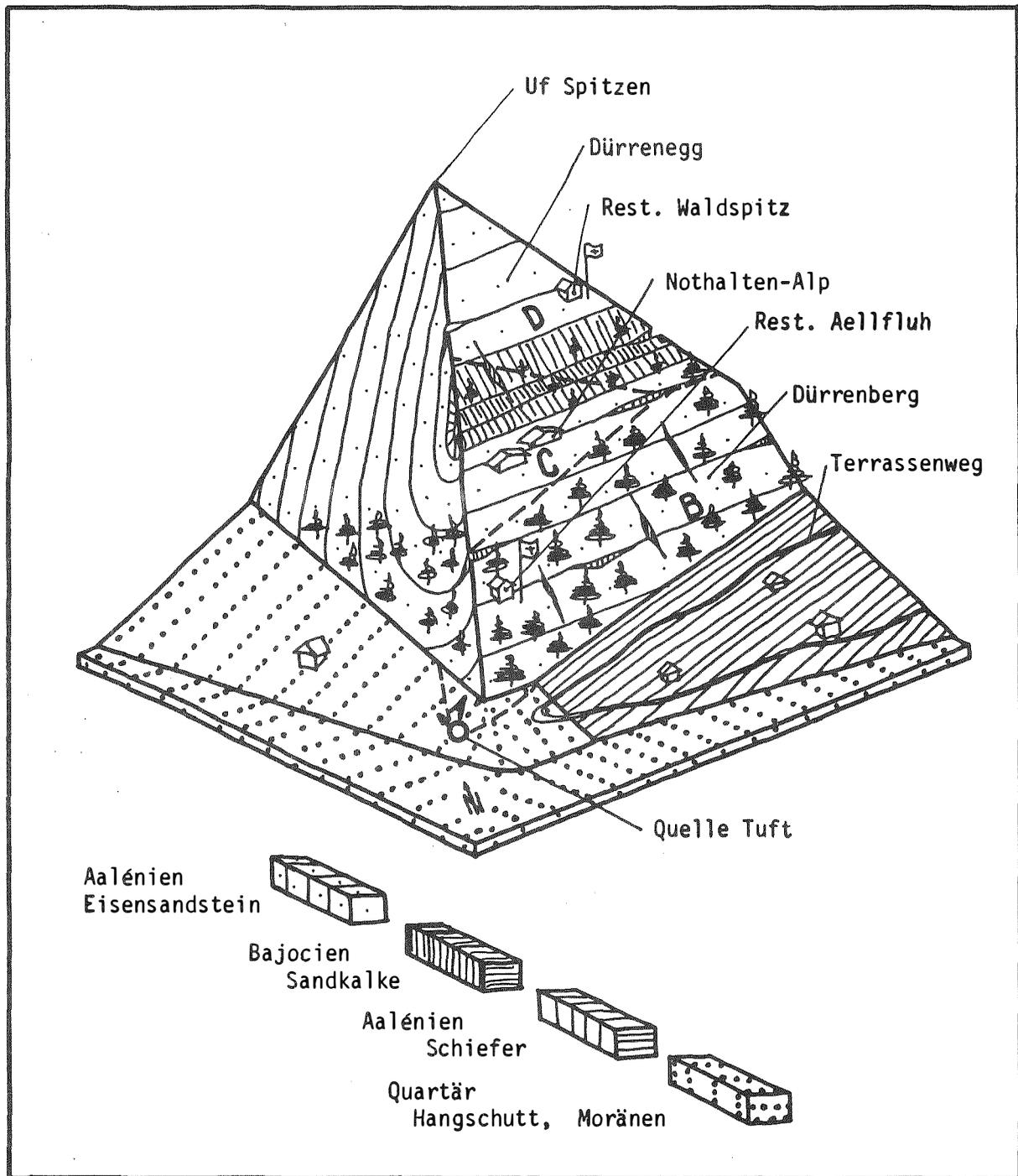


Abb. 27: Hydroökologisches Funktionsmodell der Tuftquelle. A, B, C, D sind Teilräume mit unterschiedlichem hydrologischen Verhalten und verschiedener Landnutzung.

Nach der Raumbeurteilung besteht in allen Teilräumen eine grosse potentielle Gefährdung (Tab. 16).

Die potentielle Gefährdung drückt sich heute nicht in einer entsprechenden Belastung der Quelle aus, da nur die bakteriologischen Grenzwerte teilweise überschritten werden. Daraus kann geschlossen werden, dass das Hydrosystem Tuftquelle eine grosse Persistenz aufweist. Da der Schwellenwert der Persistenz nicht bekannt ist, darf aber die potentielle Gefährdung nicht unterschätzt werden.

Diese ist hauptsächlich bedingt durch die rasche Versickerung des Wassers im Gebiet des auffallend stark zerklüfteten Eisensandstein im Wald um die Alp Nothalten. Die mehrere 10 m tiefen und bis 1 m breiten Spalten werden teils als Abfalldeponien benutzt. Die beiden Gaststätten im Einzugsgebiet lassen zudem ihre Abwässer (Stand 1982) ungeklärt versickern.

Als Szenarium wird eine intensivierete landwirtschaftliche Nutzung in den Teilräumen A, C und D und eine intensivierete touristische Nutzung in den Teilräumen B und D angenommen. Unter gleichbleibenden naturräumlichen Voraussetzungen stellt sich zwar eine leichte Verschärfung der Gefährdung ein, die "szenierete potentielle Gefährdung" bleibt aber in den gleichen Klassen wie die potentielle Gefährdung gemäss Tabelle 16.

Damit kann das hydrologische Gesamtpotential der Tuftquelle unter Einbezug der Varianz und der Persistenz beurteilt werden. Das mengenmässig grosse Potential der Tuftquelle wird durch die Wasserbeschaffenheit, die Varianz und die Persistenz nur gering eingeschränkt. Das Potential, im Sommer für ca. 29'000, im Winter für ca. 3600 Personengleichwerte (PGW) ausreichend, kann unter Vorbehalt, dass die nötigen Schutz- und Sanierungsmassnahmen ergriffen und die Landnutzung keine wesentlichen Änderungen erfährt, gesichert werden. Die Ausscheidung von geeigneten Schutzzonen ist unerlässlich. Die Abwässer der Restaurationsbetriebe und even-

Tab. 16: Raumbewertung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Tuftquelle (vgl. Tab. 14, Abb 27).

	Teilraum A	Teilraum B	Teilraum C	Teilraum D
Aquifer	Schutt, Moränen	Eisensandstein	Eisensandstein und Sandkalke	
Art des Wassers	Porengrundwasser	Kluftgrundwasser	Kluftgrundwasser	Kluftgrundwasser
Aktuelle Landnutzung	Siedlung, Mähweide	Wald, Tourismus	Alpweide	Alpweide Tourismus
Durchlässigkeit	3 / 3	5 / 5	5 / 5	5 / 5
Filterkapazität	3 / 3	5 / 5	5 / 5	5 / 5
mittlere Aufenthaltszeit	5 / 5	2 / 2	3 / 3	5 / 5
Infiltrationsmenge	3 / 3	4 / 4	4 / 4	4 / 4
Einfluss auf Infiltrationsrate	4 / 4	2 / 2	4 / 4	4 / 4
Einfluss auf chemische Wasserbeschaffenheit	4 / 5	4 / 5	4 / 5	4 / 5
Einfluss auf hygienische Wasserbeschaffenheit	5 / 5	5 / 5	4 / 5	4 / 5
	27 / 28	27 / 29	25 / 27	27 / 29
	3.86 / 4.0	3.86 / 4.14	3.57 / 3.86	3.86 / 4.14
potentielle Gefährdung	gross	gross	gross	gross
szenierte potentielle Gefährdung	gross	gross	gross	gross

tuell auch der Alphütten müssen geklärt werden. Die Klüfte und Spalten im Gebiet des Eisensandsteines dürfen nicht als Abfalldeponien benutzt werden. Auch im fassungsnahen Bereich sollten Schutzmassnahmen getroffen und geprüft werden, ob die Quelle eventuell tiefer gefasst werden könnte, um einen Oberflächeneinfluss in Quellennähe zu vermeiden.

6.3.4 Detailanalyse der Bachhaltenquelle nach dem Konvergenzansatz

Die gefasste Bachhaltenquelle liegt im Einzugsgebiet des Schwendibaches auf 1320 m ü.M. in quartären Blockschuttmassen. Die Quelle zeigt Reaktionen auf Temperaturerhöhungen, jedoch viel abgeschwächer als Klecki und auch ohne Tageschwankungen. Die mittlere Wassertemperatur liegt jedoch höher.

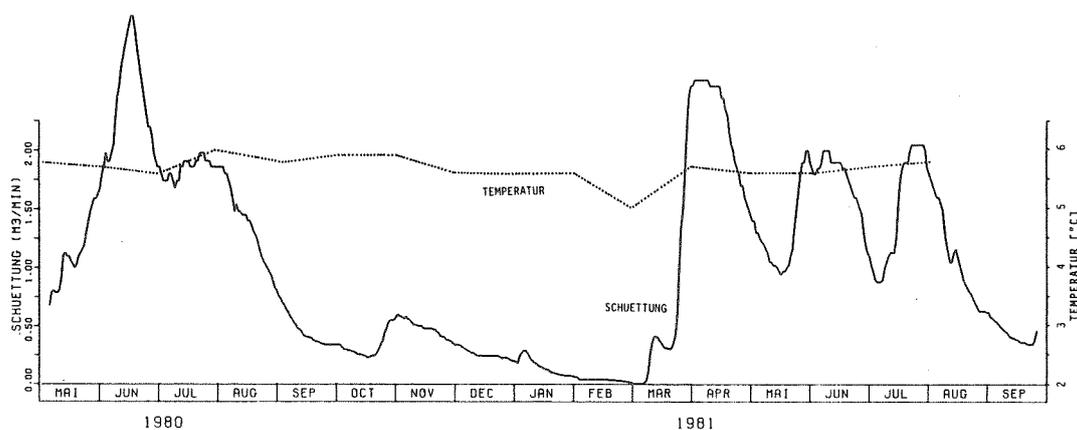


Abb. 28: Ganglinie der Quellschüttung und der Wassertemperatur der Bachhaltenquelle in Grindelwald. Tagesmittel der Messperiode Mai 1980 bis September 1981. Fläche: 1,0 Km².

Die Schüttung zeigt einen ausgeprägten Jahresgang mit maximalen Abflussmengen zwischen April und Juni und einem Minimum im Februar. Der Jahresgang ist nur schwach von kurzfristigen Schüttungsschwankungen überlagert. Hingegen zeigen sich gleich wie bei der Kleckiquelle während der Sommermonate starke Schüttungsschwankungen in ungefähr monatlichen Intervallen (Abb. 28).

Die Quelle schüttet mittelhartes Wasser. Der Chemismus ist im Jahresverlauf recht konstant, nur während der Schneeschmelze kommt es zu einer deutlichen Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit und der Wasserhärte. Natrium und Sulfatgehalt sind dabei jedoch nicht betroffen (Abb. 29).

Wie die Vergleichsmessungen (gleiche Wassertemperatur, gleicher Chemismus) der etwas tiefer gefassten, grösseren aber nicht kontinuierlich gemessenen Nachbarquelle zeigen, dürften es sich um Quellen des selben Reservoirs handeln.

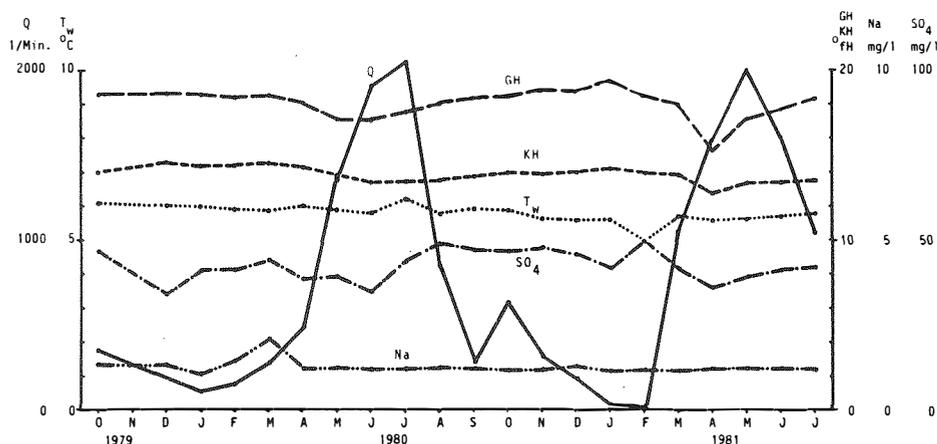


Abb. 29: Wasserbeschaffenheit der Bachhaltenquelle. Monatsmittel der Parameter Quellschüttung (Q), Wassertemperatur (T_w) Gesamthärte (GH), Karbonathärte (KH), Sulfat (SO_4) und Natrium (Na).

Die Quelle schüttet relativ junges Wasser mit einem durchschnittlichen Alter von höchstens 2 Jahren. Die angedeuteten Schwankungen im Jahresverlauf des Tritiumgehaltes mögen durch den Einfluss der jüngeren Komponente während der Schneeschmelze bedingt sein, die sich auch im Chemismus des Quellwassers durch den leichten Einbruch der Gesamthärte abzeichnet.

Als Funktionsmodell haben wir uns ein "Hydrosystem Bachhaltenquelle" vorzustellen, deren Einzugsgebiet in den Blockschuttmassen zwischen Rötihorn und Uf Spitzen auf einer mittleren Höhe von etwa 1950 m ü.M. liegen muss. Die geringe

Flussdichte lässt auf eine hohe Infiltrationsrate in den Schuttmassen schliessen, die bis in den Talgrund bei Schwen- di ziehen (Abb. 30). Das hier versickernde Niederschlags- wasser stösst im Untergrund auf Stauhорizonte aus Tonschie- fer

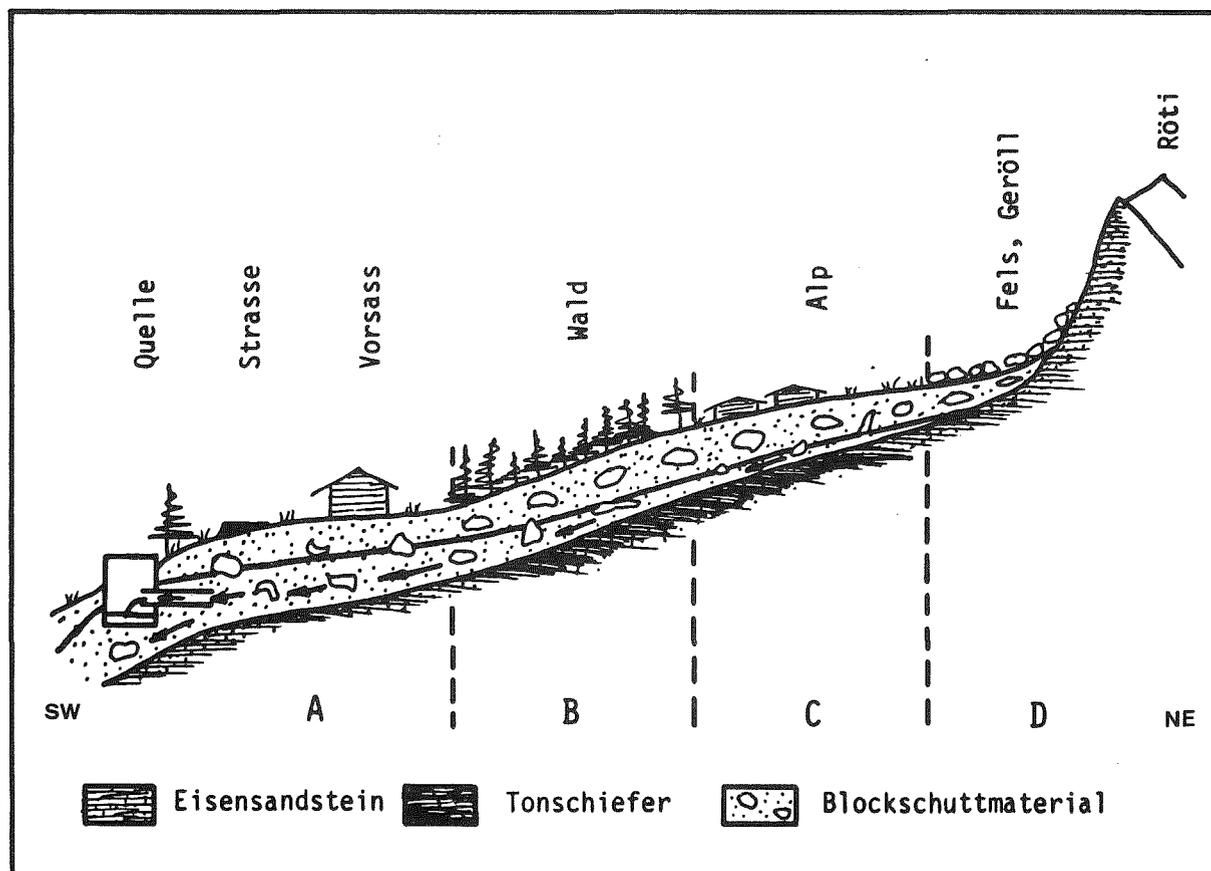


Abb. 30: Hydroökologisches Funktionsmodell der Bachhaltenquelle. A, B, C, D sind Teilräume mit unterschiedlichem hydrologischen Verhalten und verschiedener Landnutzung.

fer und Eisensandstein (KIENHOLZ 1977:65) und wird innerhalb des Lockermaterials abgeleitet. In der Gegend von Wasser- schalten (644200/165450) ist der Blockstrom vor einer leich- ten Versteilung etwas eingengt, was wahrscheinlich zur Bildung der Grundwasseraustritte beiträgt. Der ruhige aber ausgeprägte Jahresgang der Schüttung zeigt eine gute Puf- ferung gegenüber Inputeinflüssen bei grossem Reservoirsystem

an. Dieses muss kluftartige Wasserwege aufweisen, da das Fließsystem nur langsam auf Inputänderungen reagiert.

Das Dargebot der Bachhaltenquelle beträgt im Mittel rund 850 l/min an chemisch einwandfreiem und hygienisch nur leicht beeinträchtigtem Wasser. Die Varianz der Schüttung ist mit einer Schwankungsziffer von rund 630 allerdings ausserordentlich hoch und die mittlere Aufenthaltszeit beträgt nur rund zwei Jahre. Die aktuelle Belastung ist aufgrund der hydrologischen Datenaufnahme sehr klein. Nach KIENHOLZ (1977:64) ist die Blockschuttmasse meist durch eine relativ mächtige Bodenschicht bedeckt, welche grundwassergefährdende Stoffe zumindest teilweise zurückhält.

Nach der Raumbewertung besteht im Teilraum B eine kleine und in den Teilräumen C und D eine grosse potentielle Gefährdung (Tab. 17). Auch wenn im Alpgebiet die Gefährdung des Grundwassers grösser ist als im Gebiet der Vorsassen, liegt hier doch die empfindlichere Stelle. Punktuelle Verschmutzungsstellen wie Miststöcke oder flächenhafte wie Mistaustrag in Quellnähe können die Wasserqualität besonders ausserhalb der Vegetationsperiode gefährden. Im Teilgebiet A ergibt sich eine zusätzliche Gefährdung durch den Transport von Gütern auf der Erschliessungsstrasse zur Buessalp.

Die potentielle Gefährdung entspricht nur teilweise der aktuellen Belastung der Quelle, da hier nur die bakteriologischen Grenzwerte überschritten werden. Daraus kann geschlossen werden, dass das Hydrosystem Bachhaltenquelle gesamthaft eine grosse Persistenz aufweist. Allerdings muss für die einzelnen Teilräume entsprechend ihrer unterschiedlichen potentiellen Gefährdung differenziert werden. Für die Teilräume A, C und D resultieren grosse, für den Teilraum B eine mittlere Persistenz. Dieses günstige Resultat darf nicht dazu verleiten die doch vorhandene latente Gefährdung zu unterschätzen.

Als Szenarium wird eine intensivierete landwirtschaftliche Nutzung in den Teilräumen A und C angenommen. In der Wald-

Tab. 17: Raumbewertung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Bachhaltenquelle (vgl. Tab. 14, Abb.30).

	Teilraum A	Teilraum B	Teilraum C	Teilraum D
Aquifer	Blockschutt mit feinem, schiefrigem Material			Blockschutt ohne Vegetation
Art des Wassers	← Porengrundwasser →			
Aktuelle Landnutzung	Mähweide	Wald	Alpweide	ungenutzt (Wandertour.)
Durchlässigkeit	4 / 4	4 /	4 / 4	5 /
Filterkraft	3 / 3	2 /	4 / 4	5 /
Speicherung	3 / 3	3 /	3 / 3	5 /
Speisung	4 / 4	4 /	5 / 5	5 /
Einfluss auf Infiltrationsrate	4 / 5	2 /	4 / 5	1 /
Einfluss auf chemische Wasserbeschaffenheit	4 / 4	1 /	4 / 5	1 /
Einfluss auf hygienische Wasserbeschaffenheit	5 / 5	1 /	5 / 5	2 /
	23 / 24	17 /	29 / 31	24 /
	3.29 / 3.43	2.43 /	4.14 / 4.43	3.43/
potentielle Gefährdung	mittel	klein	gross	gross
szenierte potentielle Gefährdung	gross		s. gross	

und Felsstufe sind Intensivierungen kaum anzunehmen. Unter gleichbleibenden naturräumlichen Bedingungen stellt sich in beiden Teilräumen eine Verschärfung der Gefährdung ein, indem die szenierte potentielle Gefährdung je um eine Klasse steigt (vgl. Tab. 17).

Damit kann das hydrologische **Gesamtpotential** der Bachhaltenquelle unter Einbezug der Varianz und der Persistenz beurteilt werden. Das mengenmässig beträchtliche Potential der Bachhaltenquelle wird durch sehr grosse Varianz der Schüttung stark eingeschränkt. Während die sommerliche Maximalschüttung über 3000 l/min beträgt (1150 Personengleichwerte) kann die winterliche Minimalschüttung auf wenige (5) Minutenliter zurückgehen (20 PGW). Die potentielle Gefährdung ist gross und die szenierte potentielle Gefährdung zeigt an, dass Nutzungsintensivierungen in den bereits heute landwirtschaftlich genutzten Flächen zu einer Verschlechterung des Potentials führen müssten. Wirksame **Schutzmassnahmen** sind **unerlässlich**. Insbesondere sollte auch die relativ mächtige Bodenschicht, die die Blockschuttmassen meist überdeckt und welche grundwassergefährdende Stoffe teilweise zurückzuhalten vermag, vor Verletzungen geschützt werden.

sammenhang mit künstlich verursachten Niveauänderungen der Wasserspiegel gesehen werden. Die Seelein werden ihrerseits selbst von Quellen gespiesen. Sie sind gut durchmischt und bilden daher einen wirkungsvollen Puffer für die Quellschüttung und für die chemische Beschaffenheit des Schattenhalbwassers.

Die Quelle schüttet **mittelhartes Wasser** von chemisch sehr guter und bakteriologisch guter Qualität. Die Wasserbeschaffenheit ist im Jahreszeitlichen Gang nur geringen Schwankungen unterworfen (Abb. 32).

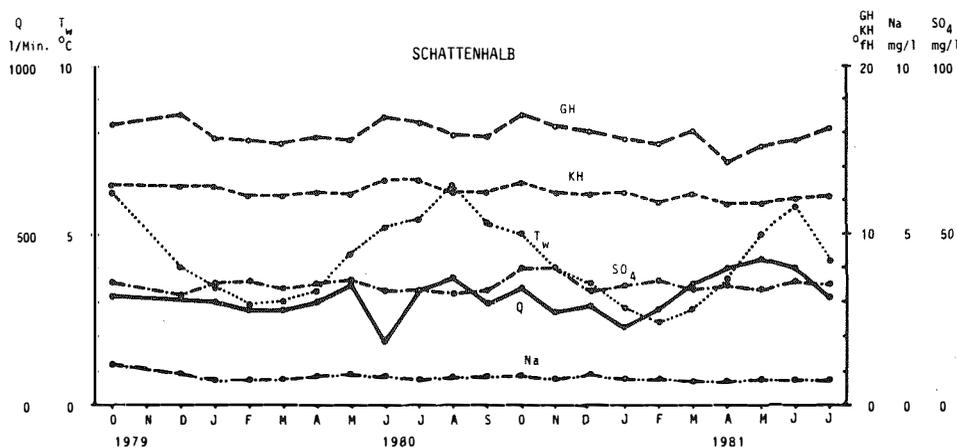


Abb. 32: Wasserbeschaffenheit der Schattenhalbquelle. Monatsmittel der Parameter Wassertemperatur (T_w), Gesamthärte (GH), Karbonathärte (KH), Sulfat (SO_4) und Natrium (Na).

Nach dem Exponentialmodell beträgt das mittlere **Wasseralter** dieser Quelle **etwa 3 Jahre**. Die schwach erkennbare Jahreschwankung im Tritumgehalt lässt die Beimischung einer jüngeren Komponente annehmen. Die mittlere **Einzugsgebietshöhe** entspricht mit rund **1600 m ü.M.** etwa der Höhenlage der Bergseelein im Itramenwald.

Diese befinden sich in einer Verflachung im obersten Teil einer nach KIENHOLZ (1977:Kartenblatt 2) verrutschten Masse von Eisensandstein, die den Untergrund des Itramenwaldes, eines noch fast unberührten Bergwaldes, bildet. Die Seelein

funktionieren zusammen mit vermuteten unterirdischen Wasseransammlungen im Staubereich der verrutschten Massen als grosser Wasserspeicher.

Aufgrund der Resultate der hydrologischen Untersuchungen und der Raumbewertung haben wir uns im Sinne eines Funktionsmodells ein Hydrosystem Schattenhalbquelle vorzustellen, das eng mit den stehenden Oberflächengewässern dieses Gebietes verbunden ist.

Im Gebiet der Seelein ist der unter dem Eisensandstein liegende schiefrige Sandstein aufgeschlossen und angeschnitten (GEOL.ATLAS DER SCHWEIZ, Blatt 396), in welchem die abflusslosen Bergseelein ihr Wasser verlieren. Das schiefrige Gestein ist schichtparallel mittel bis gut durchlässig, wogegen die im unteren Teil des Itramenwaldes durch die Sackungsmassen versickernden Wasser nur erschwert eindringen können. Im Aquifer wird das Grundwasser längs den Schichtflächen und eventuellen Klüften talwärts geleitet, bis es durch den Nebenarm des Wärgistalbaches angeschnitten wird. Hier befinden sich die Brunnstuben der Quelle Schattenhalb und auch jene der Quelle der Wasserversorgungsgenossenschaft Itramen (Abb. 33).

Das Dargebot der Schattenhalbquelle beträgt im Mittel **350 l/min** an chemisch einwandfreiem und bakteriologisch gutem Wasser. Die Varianz der Schüttung ist mit einer Schwankungsziffer von 4 nur klein. Die aktuelle Belastung ist aufgrund der hydrologischen Statusaufnahme sehr klein.

Nach der Raumbewertung ist die potentielle Gefährdung der Quelle Schattenhalb je nach Teilraum klein bis gross (Tab. 18). Teilraum A weist eine mittlere, B eine kleine und die Teilräume C und D weisen grosse potentielle Gefährdung auf.

Diese potentielle Gefährdung stimmt nur teilweise mit der aktuellen Belastung überein, denn die Quelle schüttet gutes Wasser. Nur die überschrittenen bakteriologischen Grenzwerte deuten auf eine gewisse Sensibilität des Systems hin. Daraus

kann abgeleitet werden, dass die Quelle Schattenhalb gesamt-
haft eine **mittlere Persistenz** aufweist. Diejenige des Teil-
raumes A ist etwas **geringer**, da die Aufenthaltszeiten des
Wassers klein sind. Die sporadisch festgestellten Coli-Bak-
terien im Quellwasser sind wahrscheinlich auf das Eindringen
von Oberflächenwasser aus der quellnahen Zone A, die bewei-
det wird, zurückzuführen.

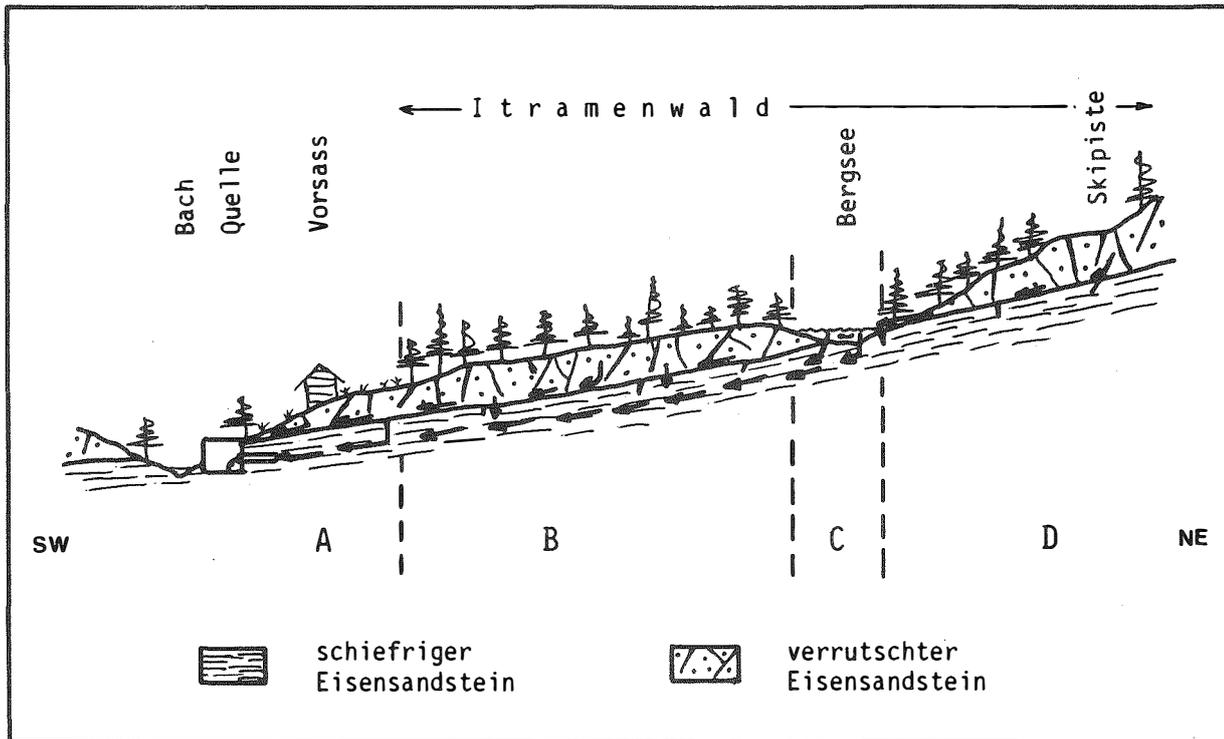


Abb. 33: Hydroökologisches Funktionsmodell der Schattenhalbquelle. A, B, C, D sind Teilräume mit unterschiedlichem hydrologischen Verhalten und verschiedener Landnutzung.

Allerdings muss hier die Einschränkung gemacht werden, dass die Seen im Quellsystem Schattenhalb ein empfindliches Element darstellen. Sie sind zu einem grossen Teil für die über das ganze Jahr ausgeglichene Quellschüttung massgebend. Grössere Spiegelabsenkungen oder sogar Trockenlegung hätten Mengeneinbussen zur Folge, die vor allem im Winter die Quellschüttung zurückgehen liessen. Ebenso darf die gute

Wasserqualität dieser Oberflächengewässer nicht beeinträchtigt werden, was sich sonst mittelfristig auf die Wasserqualität der Quellen Schattenhalb und der Wasserversorgung Itramen auswirken würde.

Tab. 18: Raumbewertung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Schattenhalbquelle (vgl. Tab. 14, Abb. 33).

	Teilraum A	Teilraum B	Teilraum C	Teilraum D
Aquifer	schiefriger Sandstein	schiefriger Sandstein	See	verrutschter Eisensandstein
Art des Wassers	Kluftwasser	Kluftwasser	Seewasser	Kluftwasser
Aktuelle Landnutzung	Mähweide	Wald	Fischweiher	Wald/Skipiste
Durchlässigkeit	3 / 3	3 /	5 / 5	4 /
Filterkraft	3 / 3	3 /	5 / 5	2 /
Speicherung	4 / 4	3 /	3 / 3	4 /
Speisung	2 / 2	2 /	5 / 5	4 /
Einfluss auf Infiltrationsrate	4 / 4	2 /	1 / 4	2 /
Einfluss auf chemische Wasserbeschaffenheit	3 / 4	2 /	1 / 3	4 /
Einfluss auf hygienische Wasserbeschaffenheit	4 / 5	2 /	2 / 5	4 /
	23 / 26	17 /	20 / 30	24 /
	3.29 / 3.71	2.43 /	3.14 / 4.28	3.43 /
potentielle Gefährdung	mittel	klein	gross	gross
szenierte potentielle Gefährdung	gross		s. gross	

Als **Szenarium** wird eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung in Teilraum A und eine fischereiwirtschaftliche Intensivierung gekoppelt mit einer touristischen Nutzung in Teilraum C angenommen. In beiden Teilräumen ver-

schärft sich die Gefährdungssituation um eine Klasse. Die szenierte potentielle Gefährdung ist in der Vorsasszone gross und im Bereich der Seelein sehr gross (vgl. Tab. 18).

Damit kann das hydrologische Gesamtpotential der Quelle Schattenhalb unter Einbezug der Varianz und der Persistenz bestimmt werden. Das mengenmässig bescheidene Potential wird durch die Varianz kaum eingeschränkt und reicht aus um rund 1200 Einwohner zu versorgen. Wirksame Schutzmassnahmen und insbesondere die Erhaltung des status quo in der Nutzung des Teilraumes C sind unbedingt nötig.

6.3.6 Detailanalyse der Anggistaldenquelle nach dem Konvergenzansatz

Die Anggistaldenquelle im Buessalpgebiet ist ungefasst doch stellt sie von der Schüttungsmenge her eine interessante Reserve für die Wasserversorgung dar. Die schüttungsstarke Quelle weist im Jahresgang grosse Schwankungen auf. Demgegenüber zeigt die Temperaturkurve einen sehr ausgeglichenen Verlauf (Abb. 34).

Die Mineralisation ist gesamthaft recht tief und der Jahresgang der Wasserhärte, des Natriums und des Sulfatgehaltes ist umgekehrt proportional zum Schüttungsgang. Die Quelle ist bakterologisch stark beeinträchtigt.

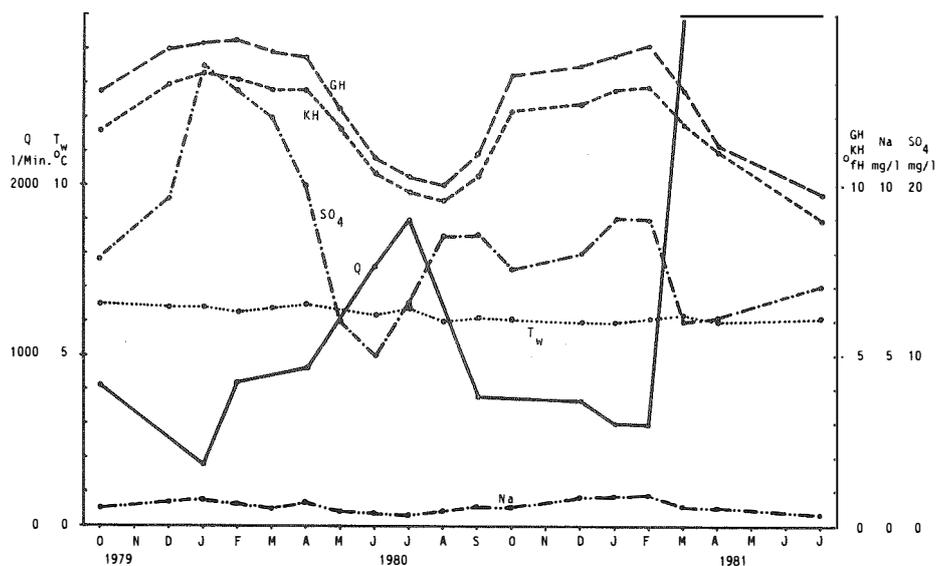


Abb. 34: Wasserbeschaffenheit der Anggistaldenquelle. Ganglinien der Monatsmittel der Parameter der Wassertemperatur (T_w), Gesamthärte (GH), Karbonathärte (KH), Sulfat (SO_4) und Natrium (Na).

Um die Erkenntnisse zum Hydrosystem und zum Einzugsgebiet zu vertiefen wurde für das Gebiet der Buessalp eine Detailkartierung der Karstphänomene (DERVEY 1981) und ein Markierver-

such (WAEELTI 1981) angesetzt. Mit diesen Kenntnissen und jenen aus den hydrologischen Untersuchungen konnte ein Funktionsmodell formuliert werden.

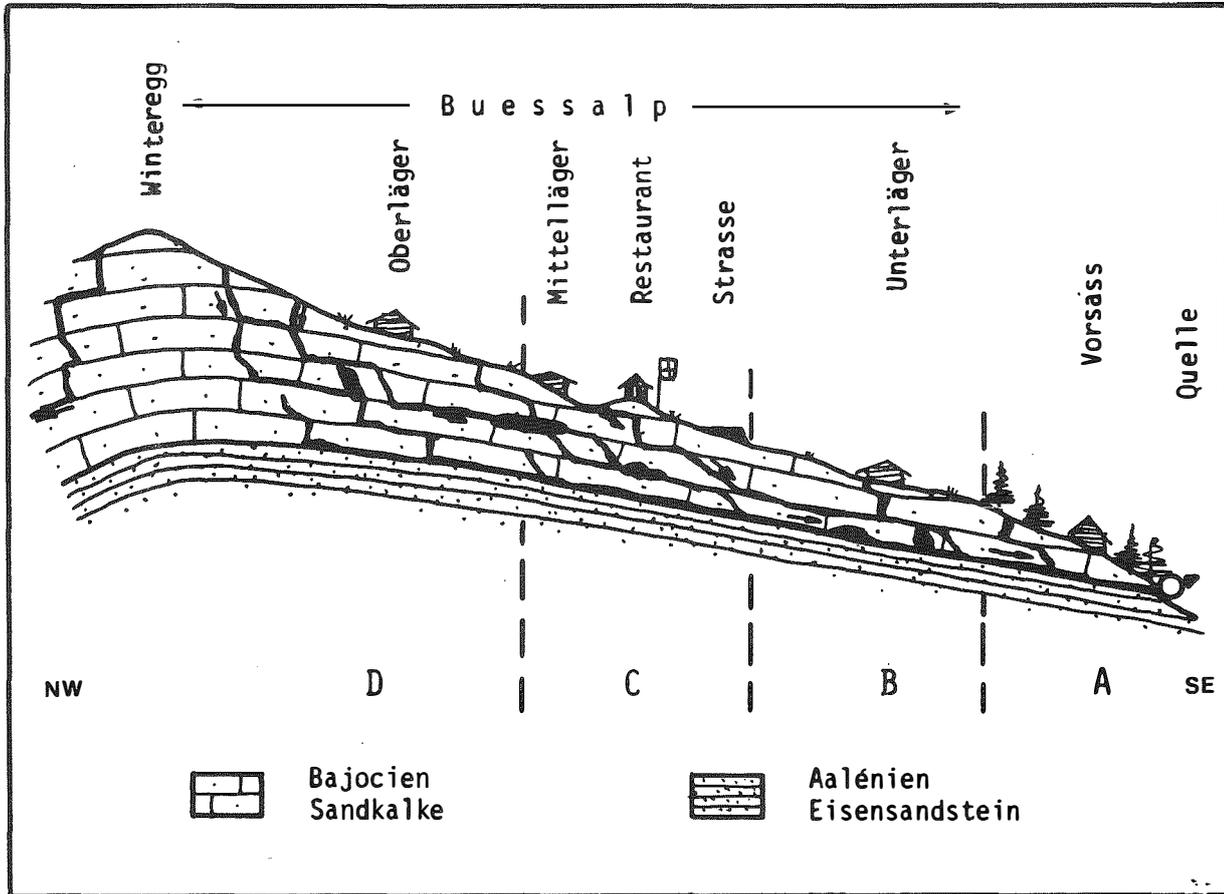


Abb. 35: Hydroökologisches Funktionsmodell der Anggistaldenquelle. A, B, C, D sind Teilräume mit unterschiedlichem hydrologischen Verhalten und verschiedener Landnutzung.

Die Sandkalke der Buessalp weisen verbreitet Karstphänomene wie Karren, Dolinen und Ponore auf. Leitfähigkeit und Schüttung zeigen den raschen und deutlichen Einfluss der Schneeschmelze. Im Markierversuch zur Abklärung der hydrologischen Zusammenhänge zwischen Buessalp und Anggistaldenquelle wurden ausserordentlich hohe Fliessgeschwindigkeiten gemessen. Als Einzugsgebiet kommt das ganze Buessalpgebiet in Betracht.

Wir betrachten deshalb die Quelle als Wasseraustritte eines karst- oder karstähnlichen Systems. Die im Jahresverlauf kleinen Temperaturschwankungen weisen auf ein recht grosses und gut durchmischtes Reservoir hin, das aber trotzdem zum mindesten von einzelnen Wasserbahnen rasch durchflossen wird (Abb. 35).

Das Dargebot der Anggistaldenquelle beträgt im Mittel 1500 l/min an chemisch gutem aber bakteriologisch stark verschmutztem Wasser. Die Varianz der Schüttung ist mässig ($S_k = 8$).

Im geologisch und hydrologisch einheitlichen "Karst"-Einzugsgebiet ist die potentielle Gefährdung des unterirdischen Wassers gross bis sehr gross. Tatsächlich wurde auch für die meisten Beprobungszeitpunkte die hygienische Qualität des Wassers beanstandet, so dass es im heutigen Zustand nicht unaufbereitet als Trinkwasser abgegeben werden könnte. Insbesondere der Teilraum C ist durch touristische Nutzung sehr stark gefährdet. Das grosse Restaurant ist nicht an die Kanalisation angeschlossen. Seine Abwässer werden einer Klärgrube zugeleitet, die oft überläuft oder sogar über die Wiesen entleert wird. Durch einen Markierungsversuch im Herbst 1980 wurde der Zusammenhang zwischen dem Vorfluter des Klärgruben-Ueberlaufs und der Anggistaldenquelle nachgewiesen. Es erstaunt deshalb nicht, dass das Quellwasser häufig bakteriell verunreinigt ist (Tab. 19).

Die potentielle Gefährdung deckt sich mit der aktuellen Belastung die in der starken hygienischen Verschmutzung des Wassers zum Ausdruck kommt. Die Persistenz des Quellsystems Anggistalden ist deshalb nur klein.

Eine angenommene Intensivierung müsste zu einer verstärkten Belastung im Sektor Wasserbeschaffenheit führen. Die Bewertung des Endpotentials unter Berücksichtigung von Varianz und Persistenz zeigt eine starke Minderung des mengenmässigen Potentials durch die Wasserqualität. Allerdings schränkt auch die Varianz der Schüttung das Potential ein.

Tab. 19: Raumbeurteilung zur Ermittlung der potentiellen Gefährdung im Einzugsgebiet der Anggistaldenquelle (vgl. Tab. 14, Abb. 35).

	Teilraum A	Teilraum B	Teilraum C	Teilraum D
Aquifer	← Sandkalke des Bajocien →			
Art des Wassers	← Karst- und Kluftwasser →			
Aktuelle Landnutzung	Mähweide/ Wald	Alpweide	Alp/Tourismus	Alpweide
Durchlässigkeit	4 / 4	4 / 4	4 / 4	4 / 4
Filterkraft	4 / 4	4 / 4	4 / 4	4 / 4
Speicherung	4 / 4	4 / 4	4 / 4	4 / 4
Speisung	3 / 3	4 / 4	4 / 4	4 / 4
Einfluss auf Infiltrationsrate	2 / 3	4 / 5	4 / 5	4 / 5
Einfluss auf chemische Wasserbeschaffenheit	4 / 5	4 / 5	5 / 5	4 / 5
Einfluss auf hygienische Wasserbeschaffenheit	4 / 5	5 / 5	5 / 5	5 / 5
	25 / 28	29 / 31	30 / 31	29 / 31
	3.57/4.0	4.14/4.43	4.29/4.43	4.14/4.43
potentielle Gefährdung	gross	gross	s.gross	gross
szenierte potentielle Gefährdung	gross	s.gross	s.gross	s.gross

Im Sommer könnten rund 11'000, im Winter nur etwa 1'200 Personen versorgt werden. Diese Versorgungskapazität könnte bei vollständiger Erfassung aller Quellaustritte dieser Quellflur etwa verdoppelt werden. Die nur geringmächtigen Böden

im Alpgebiet der Buessalp haben eine beschränkte Sorptionskapazität und die grosslumigen Karstwasserwege im Untergrund sind als Filter nur gering wirksam. Die Persistenz der Quelle ist in bezug auf Wasserqualität damit sehr klein und bei der heutigen Nutzung des Einzugsgebietes als Alpwirtschafts- und Touristikraum bereits überschritten.

Die von der Wasserbeschaffenheit her bestehende Potentialbeschränkung kann zwar mit technischen Massnahmen (Entkeimung) aufgehoben werden. Als Dauerlösung kommt aber dies aus psychologischen Gründen kaum in Frage. Der hydrologische Kurzschluss zwischen Abwasserversickerung und Quelle ist untragbar.

6.3.7 Analyse weiterer Quellen und des Porengrundwassers

Das weiche Wasser der Holensteinquelle erfährt im Jahresverlauf Änderungen in der Gesamtmineralisation. Die wenigen Temperaturmessungen deuten eine recht grosse Schwankung an. Die tiefe Temperatur von etwa $3,5^{\circ}\text{C}$ im Sommer deutet eine halbjährige Phasenverschiebung an (Abb. 36).

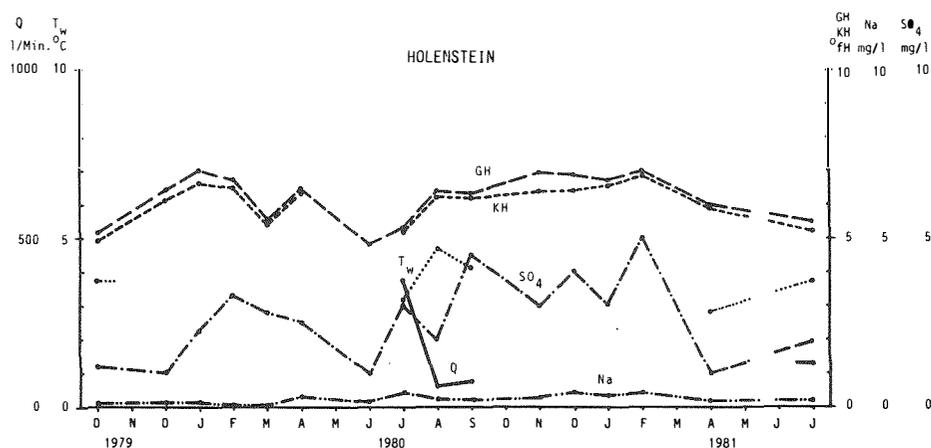


Abb. 36: Wasserbeschaffenheit der Holensteinquelle. Ganglinien der Monatsmittel der Parameter Gesamthärte (GH), Karbonathärte (KH), Sulfat (SO_4) und Natrium (Na). Die Quellschüttung und die Wassertemperatur konnten nur vereinzelt gemessen werden.

Die schwankende Leitfähigkeit und Wasserhärte der Quelle Buessalp Mittelläger zeigt den Einfluss der Schneeschmelze deutlich an. Auch die Temperatur macht kurzfristige Schwankungen mit. Der Sulfatgehalt schwankt sehr stark (Abb. 37). Die mitten im Alpwirtschaftsgebiet gelegene Quelle zeigt relativ hohe Kalium- und die höchsten Phosphat-Gehalte aller beprobten Wasseraustritte (vgl. Tab. 13). Dies, zusammen mit dem Vorkommen von Trübstoffen im Wasser während der Schneeschmelze, ist ein Hinweis auf schlechte Filterwirkung der unvollständigen Deckschichten. Obwohl das Quellwasser oberflächennah gefasst ist, muss doch ein beträchtliches Reservoir vorhanden sein. Möglicherweise speichern die auf etwa 2200 m ü.M. gelegenen Bergseelein (641'400/167'600) einen Teil der zur Aufrechterhaltung der winterlichen Quellschüt-

tung notwendigen Wassermengen.

Das Grundwasser in der Talfüllung Gryt zeigt im Jahresverlauf eine konstante, relativ niedrige Mineralisation. Demgegenüber weist der Grundwasserstand einen ausgeprägten Jahresgang auf (Abb. 38). Im Winter kann der Wasserspiegel durch Exfiltration in die Lütschine bis gegen 3 m unter Flur absinken. Die Wassertemperatur schwankt im Jahresgang mit einer Amplitude von etwa 2⁰C. Die Speisung des Grundwassers bei Gryth erfolgt - abgesehen von Niederschlagsinfiltrationen in der Ebene selbst - durch Quellen und Hangwasser.

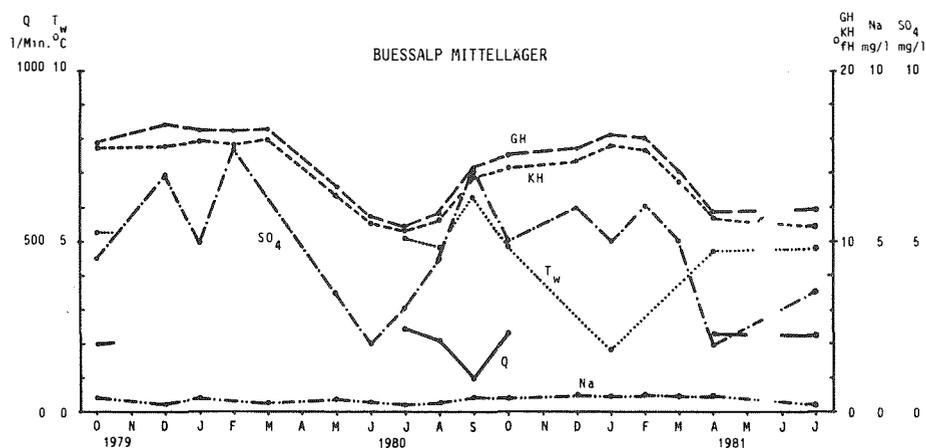


Abb. 37: Wasserbeschaffenheit der Quelle Buessalp-Mittel-läger. Ganglinien der Monatsmittel der Parameter Wassertemperatur (T_w), Gesamthärte (GH), Karbonathärte (KH), Sulfat (SO_4) und Natrium (Na).

Das Alter des im Pumpwerk Gryth aus rund 10 m Tiefe geförderten Wassers beträgt nach den Isotopenanalysen etwa 3 Jahre. Vergleiche mit dem Tritiumgehalt des Gletscherwassers der Lütschine lassen keinen deutlichen Anteil an Gletscherschmelzwasser im Grundwasser erkennen. Die errechnete mittlere Höhe von 1900 m ü.M. für das Einzugsgebiet, zusammen mit der Absenz von Lütschinenwasser zeigen, dass für das Grundwasser in der Umgebung des Brunnens Gryth das Einzugsgebiet an der Flanke gegen die Ostegg des Mittellegigrates

464'200/160'800) gesucht werden muss. Hier liegen bis lange in den Sommer grössere Lawinenschneereste (Schlüsselouwine, Geidelgraben), die vom Mittellegigrat kommend, wahrschein-

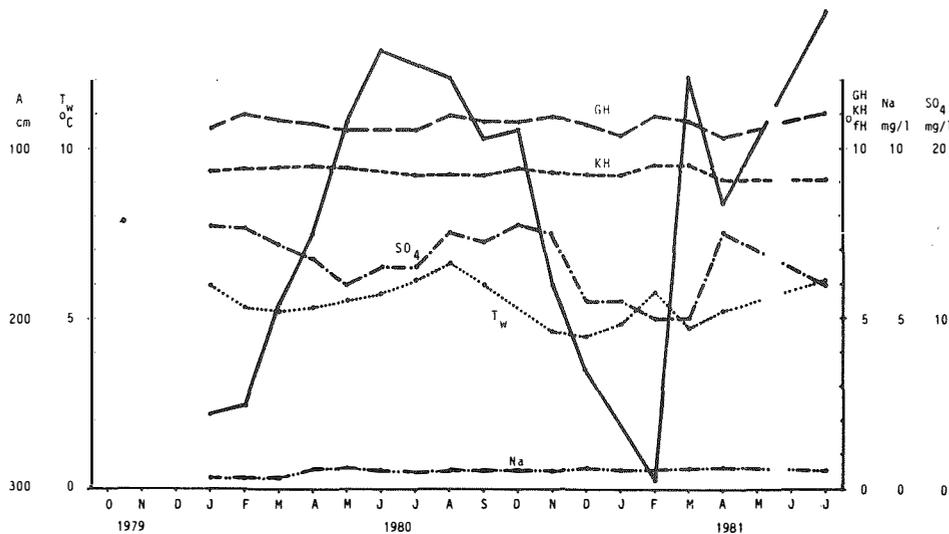


Abb. 38: Ganglinien der Monatsmittel einzelner Parameter des Porengrundwassers bei Gryth. Die ausgezogene Linie zeigt den Grundwasserstand. (A: Abstich). T_w : Wassertemperatur, GH: Gesamthärte, KH: Karbonathärte, SO_4 : Sulfatgehalt, Na: Natriumgehalt.

lich auch die verschiedenen Quellen speisen, die am Rande der Ebene austreten (Nellenbalm, Luterbächlein). Ein weiteres Indiz für die Speisung durch Hangwasser ist das oftmalige totale Versickern des Allouwinenbaches, obschon in seinem Einzugsgebiet am Mittellegigrat bis lange in den Sommer hinein grosse Schneemengen abgeschmolzen werden.

6.4 Zusammenfassendene Betrachtung des hydrologischen Potentials

Das Naturdargebot an Wasser kann nur beschränkt durch den Menschen genutzt werden. So wird der Niederschlag nur passiv genutzt, Steuerungsmöglichkeiten gibt es kaum. Für Grindelwald sind sie jedenfalls nicht relevant. Das Niederschlagsdargebot ist für eine mögliche Landnutzung in Grindelwald genügend hoch. Allenfalls besteht sogar ein Ueber-Dargebot das potentialmindernd wirkt.

Von den zahlreichen hydrologischen Teilpotentialen im Alpenraum sind das Wasserkraft- und das Wasserversorgungspotential die wichtigsten. Das an die Fliessgewässer gebundene Wasserkraftpotential ist im Untersuchungsraume Grindelwald bescheiden und bereits weitgehend ausgeschöpft. Die Bedeutung der Fliessgewässer (Ao) ist gegeben durch ein hohes landschaftliches Potential (GROSJEAN 1986), als Entsorgungspotential für die Abwässer (Trinkwasserpotential) sowie als Speisungselement für die Grund- und Quellwässer.

Die chemischen Wasseranalysen der wichtigen Seitenbäche der Lütschine im Raum Grindelwald von Oktober 1979, Juli 1980 und Juli 1981 ergeben eine Uebersicht über die gelösten Inhaltsstoffe der Lütschinezubringer.

Von den Kationen herrschen in allen Bächen Calcium und Magnesium vor, während Natrium und Kalium nur schwach vertreten sind. Auf der Anionen-Seite finden wir vor allem das Hydrogenkarbonat. Der Sulfatanteil ist je nach Herkunft des Wassers unterschiedlich. Nitrat tritt in der Grössenordnung von 1 mg/l auf, was den Konzentrationen unbelasteter Gewässer entspricht (EIDG. DEPARTEMENT DES INNERN 1979). Die Konzentration des Chloridions bleibt in den Sommerbeprobungen deutlich unter 1 mg/l, nur im Herbst liegt sie bei allgemein leicht erhöhter Mineralisation um 2 mg/l.

In Grindelwald wurde bis nach Abschluss der Untersuchungen das **Abwasser** ungeklärt den Oberflächengewässern übergeben. Die Hauptleitung der Kanalisation der Gemeinde mündet etwa 500 m unterhalb der Bahnstation Grund in die Lütschine. Als Indikator für die anthropogene Beeinflussung ist in Abbildung 39 der Verlauf der Phosphatkonzentration (Gesamtphosphor) der Lütschine bei Schwendi im Vergleich zu jener der beiden Gletscherabflüsse und zu dem gewichteten Mittel aller Seitenbäche für die erhobenen Einzelproben dargestellt. Zum

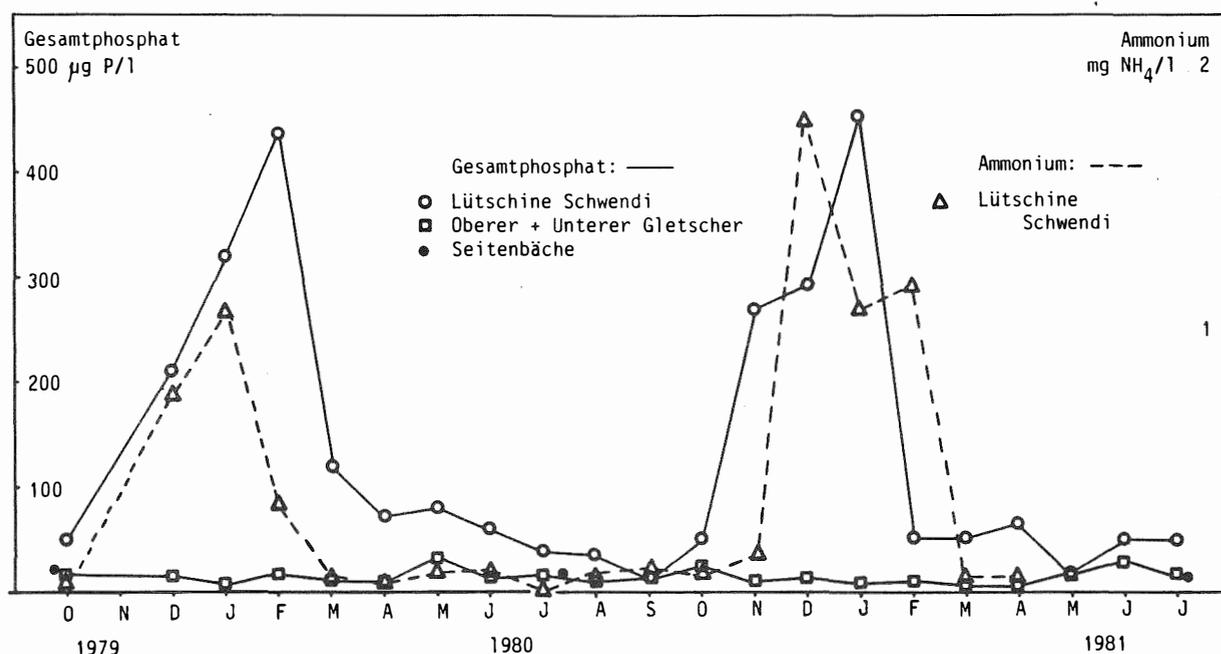


Abb. 39: Ganglinien der Gesamtphosphat- und Ammoniumkonzentrationen der monatlichen Stichproben im Gletscher- und Lüttschinenabfluss. Von den Seitenbächen liegen drei Stichproben zum Gesamtphosphat vor.

Zeitpunkt der drei Uebersichtsbeprobungen im Herbst 1979 und in den beiden Sommern 1980 und 1981 lag das gewichtete Mittel aller Nebenbäche der Lüttschine sehr nahe bei den PO_4 Werten der Gletscherabflüsse, welche im Jahresverlauf praktisch keine Schwankungen zeigen und etwa um den Wert $0,015 \text{ mg P/l}$ pendeln. Die Lüttschine allerdings zeigt nach der Mündung der Kanalisation eine jahreszeitlich sehr stark

variierende Phosphat-Konzentration mit der grössten Belastung im Winter bei niedrigster Wasserführung der Lütschine ($<1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Im zeitlichen wie auch im abflussgewichteten Mittel bleibt die Phosphat-Konzentration (134 bzw. $59 \mu\text{g}/\text{l}$) unter dem in PERRET (1977) angegebenen Mittel von $245 \mu\text{g}/\text{l}$ für schweizerische Fliessgewässer. Im Sommer wirkt sich bei der Lütschine die starke Verdünnung durch die Seitenbäche und durch das Schmelzwasser der beiden Gletscher günstig aus. Die Phosphatfracht der Lütschine beträgt im Mittel über die Messperiode $430 \text{ mgP}/\text{s}$, mit minimalen Werten um $50 \text{ mgP}/\text{s}$ und maximalen Werten um $1000 \text{ mgP}/\text{s}$. Die Analysen beruhen auf Einzelproben, die jeweils Ende Monat zu unterschiedlichen Tageszeiten entnommen worden sind.

Der KMnO_4 Verbrauch als Indikator für den Gehalt an organischem Material lag bei der Lütschine Schwendi 2 bis 3 mal höher als bei den Gletscherabflüssen. Für das Ammoniumion ist in Abbildung 39 der Gang der Konzentration in der Lütschine bei Schwendi dargestellt, der im wesentlichen ähnlich wie der Phosphatgehalt verläuft. Bei den anderen Bächen wie bei den Gletscherabflüssen lag die Ammoniumkonzentration zu den Beprobungszeiten bei Null oder an der Nachweisgrenze. Mit den übrigen untersuchten chemischen Parametern lässt sich in der Lütschine kein eindeutig anthropogener Einfluss nachweisen.

Als bedeutendes Potential ist im Raum Grindelwald das Quellwasser zu bezeichnen. Entsprechend den allgemeinen hydrologischen Verhältnissen weist die Quellschüttung im Sommer ein Maximum und im Winter ein Minimum auf. Das Dargebot an Quellwasser ist in den Sommermonaten um ein Mehrfaches grösser als im Winterhalbjahr und übersteigt dann den Wasserbedarf bei weitem (Abb. 40). Ausschlaggebend für die Nutzung sind daher die Perioden geringster Schüttung im Winter bei gleichzeitiger starker touristischer Auslastung. Eine vertiefte Untersuchung des Trinkwasser-Gesamtpotentials kann sich daher auf diese Phase beschränken.

Das Wasserangebot der vier grossen Quellen in Grindelwald erreichte 1980-81 die in Tabelle 20 angegebenen Mengen. Die Periode geringsten Angebotes liegt in den Monaten November bis März, wobei sich die Niederwasserperiode nicht mit den Monatsanfängen und -enden zu decken braucht.

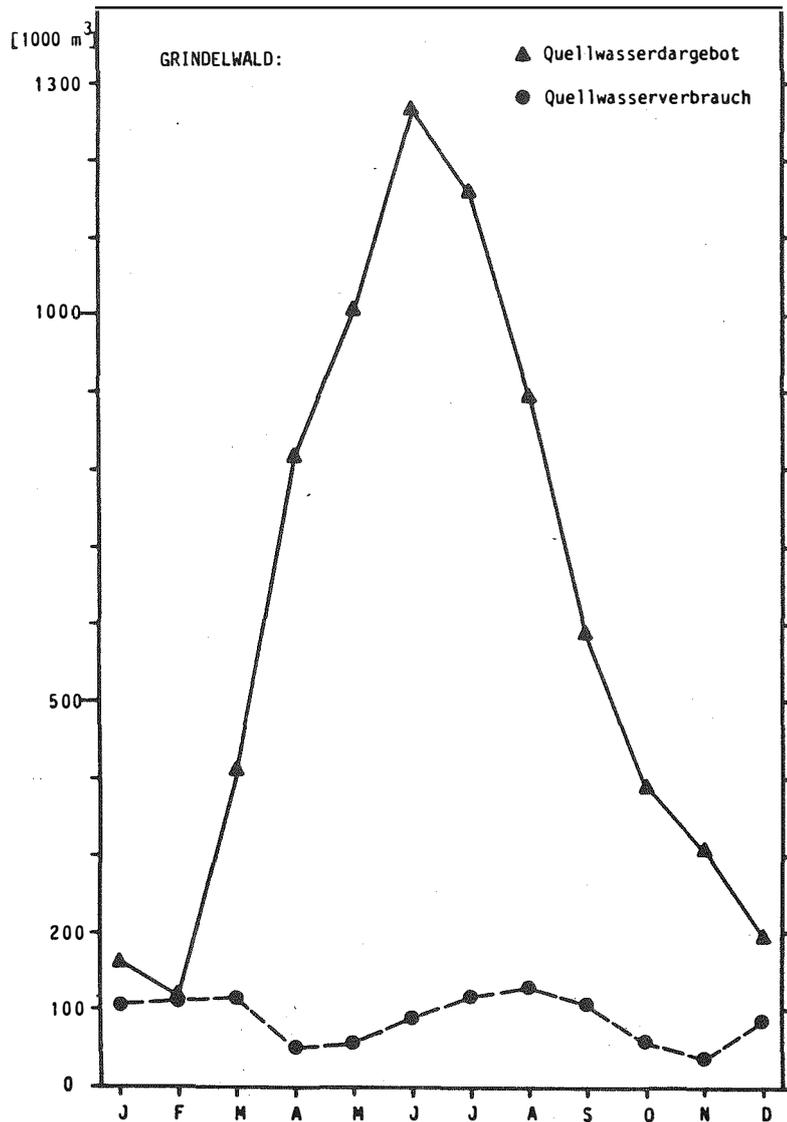


Abb. 40: Monatsmittel des Quellwasserangebotes und Quellwasserverbrauches im Untersuchungsgebiet Grindelwald im Jahresverlauf.

Bezüglich der Fragestellung und der Dimensionierung der Wasserversorgungsanlagen ist es entscheidend zu wissen, wie sich die Quellschüttungen bei länger andauerndem Winter verhalten. Die Quellschüttungen nehmen nach dem Maximalstand im Juni stetig ab, um im Februar den Minimalwert zu erreichen. Die Gesetze der Natur lassen es als ganz unwahrscheinlich erscheinen, dass die Frühjahrsschmelzperiode einmal später als im April, also um mehr als einen Monat verschoben, beginnt. Die Extrapolation braucht deshalb nur für diesen Zeitraum durchgeführt zu werden.

Tab. 20: Dargebot der gefassten Quellen im Untersuchungsgebiet Grindelwald. Monatliche Mittelwerte aus der Untersuchungsperiode 1980/81, in m³/min (aus FELBER 1982).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Klecki	1,2	0,7	3,8	8,2	9,8	13,9	12,9	9,2	5,7	3,1	3,3	1,8
Bachhalten	0,2	0,0	0,4	2,4	1,3	2,1	1,6	1,4	0,5	0,3	0,5	0,3
Schattenhalb	1	1	2	3	4	5	5	4	2	2	1	1
Tuft	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
Wagisbach	1	1	3	5	7	8	6	5	5	3	2	1
	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
total	3,8	3,1	9,5	19,2	22,8	29,7	26,1	20,2	13,8	8,9	7,2	4,5
Dargebgt in 1000 m ³ /Mt.	170	125	424	829	1018	1283	1165	902	596	397	311	200

Bei der Betrachtung der Niedrigwasserabflüsse gehen wir davon aus, dass nur der Basisabfluss in die Berechnung eingehen darf. Kurzfristige winterliche Schmelzwasseranfälle oder flüssige Niederschläge werden entweder ganz von der Schneedecke absorbiert oder zeigen sich als nur ganz kurzfristige Schüttungsphasen in einzelnen Quellen. Die Abtrennung des Basisabflusses erfolgte über die monatlichen Dauerkurven der täglichen mittleren Quellschüttungen der Quellen Klecki, Bachhalten und Schattenhalb. Als Basisabfluss gelten die

niedrigsten Tageswerte bis zum ersten Knick in der Dauerkurve. Alle Werte oberhalb enthalten bereits kurzfristiges Grundwasser (Abb. 41). Die Schüttungen der Wintermonate der einzelnen Quellen ergeben nun typische exponentielle "Auslaufkurven", die durch Geraden sehr gut approximiert werden können (PEREIRA u. KELLER 1982). Die Steigungen der Geraden können als "Auslauffunktion" bezeichnet werden. Die Gerade des letzten Teilabschnittes mit der geringsten Steigung beschreibt den Basisabfluss. Sie lässt sich sehr gut bestimmen ($r > 0,95$).

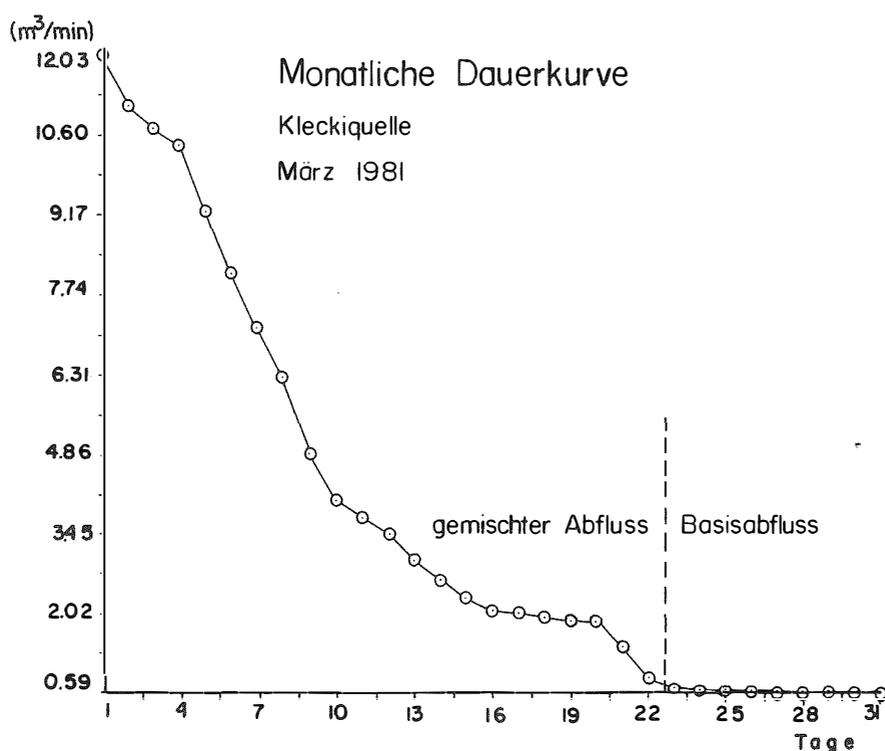


Abb. 41: Dauerkurve der Tagesmittelwerte der Kleckquelle vom März 1981 mit der Abtrennung des Basisabflusses.

Die Abnahme der Schüttung verhält sich umgekehrt proportional zur Schüttungsmenge der Quellen. Im letzten Niedrigwasser-Monat (März) beträgt das über die Niedrigwasseranalyse berechnete Mittel der Gesamtschüttung der drei Quellen 19 l/s. Extrapoliert man die einzelnen Quellen über die Auslauffunktionen, ergibt sich eine mittlere Schüttung nach

einem Monat verlängerter Trocken- und Winterperiode von 9,75 l/s. Die "Halbwertszeit" der Quellschüttung beträgt in den Wintermonaten somit rund 1 Monat (Abb. 42).

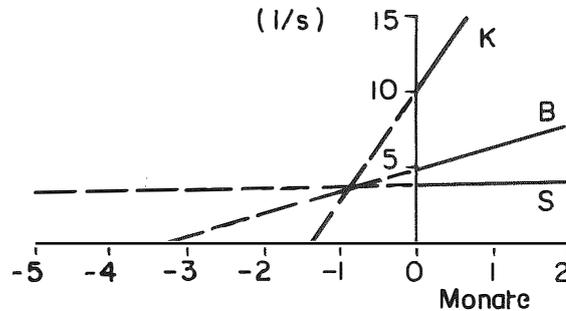


Abb. 42: Regressionsgeraden des Basisabflusses der Quellen Klecki (K), Bachhalten (B) und Schattenhalb (S) der Winterperiode 1980/81 mit linearer Extrapolation.

Unter der Annahme, dass sich die übrigen, kleineren und nicht gemessenen Quellen in ihrer Gesamtheit bezüglich Speicherauslauf gleich verhalten, beträgt das nach einem weiteren Trockenmonat zu erwartende Quellwasserangebot 26 l/s. Das verfügbare Potential an konsumbarem Trinkwasser wird weitgehend durch den Quellabfluss der Wintermonate bestimmt. Nach den heutigen Kenntnissen liegt dieses Potential bei 50 l/s bzw. 26 l/s bei verlängerter Winterperiode. In einem Normalwinter (50 l/s) entspricht das Potential (Wasserdargebot) ungefähr dem heutigen Bedarf. Im Porengrundwasser (PW Gryth) liegt noch eine Reserve deren Grösse aber unbekannt ist. Auch das Porengrundwasser weist jedoch im Winter Minimalstände auf.

Das durch die Menge bzw. deren Varianz gegebene Potential wird durch die chemische Wasserbeschaffenheit aktuell nicht vermindert. Es sind keine Grenzwerte überschritten. Nur bei der bakteriologischen Seite sind Anzeichen vorhanden, dass

sich Verschmutzungsquellen in den Einzugsgebieten in Zukunft verstärkt auswirken könnten. Die Schaffung wirksamer Schutz-zonen wird daher dringend empfohlen.

7. VARIANZ

Die Frage der Varianz stellt sich für alle Glieder des hydrologischen Kreislaufes, im besonderen jedoch für die Hauptelemente, die das hydrologische Potential im Sinne der Fragestellung bestimmen.

Für den Niederschlag liegen die Werte der Messperiode stark über dem langjährigen Durchschnitt im Bereich der höchsten Werte. Der unkorrigierte Mittelwert der Station Grindelwald-SMA der Periode 1901-1980 beträgt 1280 mm (vgl. Tab. 3). Der Jahreswert 1981 aus der Messperiode stellt mit 1798 mm sogar den Maximalwert der Beobachtungsperiode 1901 - 1981 dar. Der minimale je gemessene Jahresniederschlag beträgt 874 mm (Jahr 1922). Die Spannweite beträgt somit 924 mm oder 68% und 140% des Mittelwertes. Eine Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Jahresniederschlages wurde nicht durchgeführt.

Potentialsmindernd wirken sich extreme Einzelereignisse aus. Die Grundlagen zur Beurteilung sind in ZELLER et al. (1984) aufgearbeitet.

Bezüglich des landwirtschaftlichen Potentials werden sich nämlich auch trockene Jahre im Raume Grindelwald nicht negativ auswirken, da mit einem langjährigen mittleren Gebiets-Niederschlag von >1700 mm auch für eine Grünlandnutzung sicher genügend Meteorwasser zur Verfügung steht.

Nach den Untersuchungen von SCHAEDLER (1985) sind die Schwankungen der jährlichen Verdunstungswerte nur sehr gering (vgl. auch Kap. 5.2). Sie dürften deshalb für die weiteren Betrachtungen zum hydrologischen Potential des Untersuchungsraumes vernachlässigt werden.

Ein Vergleich der spezifischen Abflüsse (q) der Messperiode mit der langjährigen Reihe 1934-80 (Lütschine-Gsteig) zeigt, dass in der Untersuchungsperiode maximale Jahresabflüsse zu verzeichnen waren. Der mittlere Jahresabfluss 1981 stellt in der Reihe 1934-80 sogar den Extremwert dar. Er liegt 27% über dem langjährigen Mittel. Die hohen Abflüsse der Untersuchungsperiode haben bezüglich des landschaftlichen Potentials und der Speisung durch Infiltration in das Grundwasser keine Bedeutung. Das in Kapitel 6.3.6 angesprochene Entsorgungspotential der Lütschine hingegen muss relativiert werden. Neben der langjährigen Variabilität weist der Gerinneabfluss der Lütschine besonders auch eine grosse Schwankung innerhalb des Jahres auf. Diese Variabilität wirkt sich in gleicher Weise auf die verschiedenen Potentiale aus. Der Abfluss der Lütschine bei Schwendi weist ein b-glaziales Abflussregime auf. Dieses Regime zeigt bei den Niedrigwasserabflüssen während der Wintermonate eine höhere Variabilität als bei den sommerlichen Abflüssen. Das Regime des Einzeljahres weicht nur sehr gering vom langjährigen Regime ab (ASCHWANDEN und WEINGARTNER 1985).

Die Quellabflüsse weisen gesamthaft eine starke Saisonalität auf. Für die Potentialbestimmung ist die Varianz während der Niedrigwasserperioden im Winter von ausschlaggebender Bedeutung. In der übrigen Zeit ist die Varianz bei reichlichem Quellwasser nicht relevant. Diesem Sachverhalt liegt das Wechselspiel zwischen den einzelnen Wasserhaushaltsgliedern zugrunde wie es für alpine Verhältnisse typisch ist.

Eine Gegenüberstellung von Niederschlag und Abfluss lässt die prinzipiellen Mechanismen von input - Speicherung - output des Wassers im Raume Grindelwald erkennen (Abb. 43). Von Oktober bis März/April überwiegt der Niederschlag den Abfluss. Der Schneespeicher wird aufgefüllt. Der Abfluss ist hauptsächlich durch Grundwasser gespeist, der Grundwasserspeicher wird somit entleert. Ab März/April beginnt die Schneeschmelze. Der Schneespeicher wird entleert, und gleichzeitig wird der Grundwasserspeicher durch Schmelzwasser aufgefüllt, bis überfüllt, sodass ein oberirdischer

Abfluss erfolgt. Wir können somit davon ausgehen, dass im Raume Grindelwald die Quellwasserspeicher in jedem Jahr, ob trocken oder nass, vollständig aufgefüllt werden.

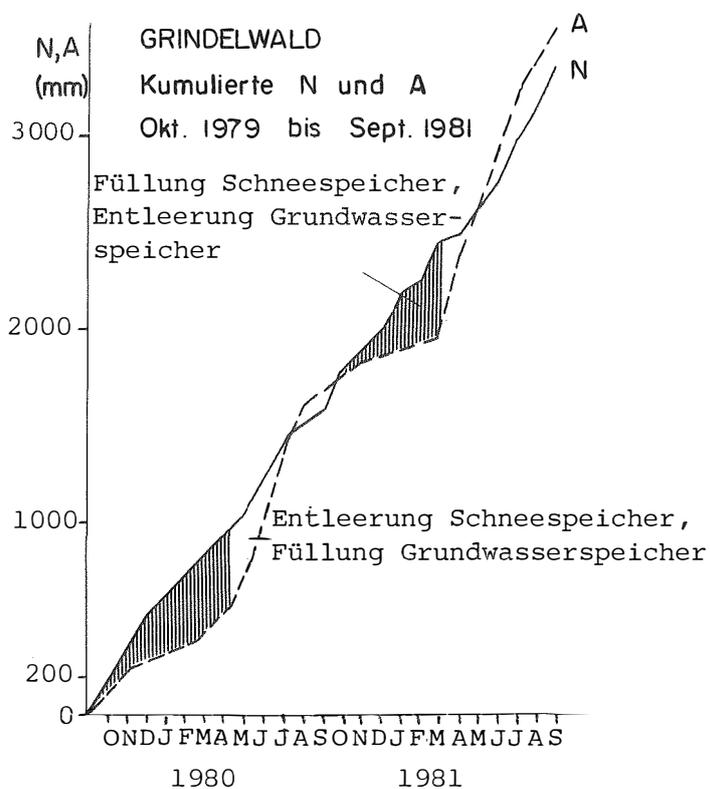


Abb. 43: Summenkurven von Niederschlag und Abfluss der hydrologischen Jahre 1980 und 1981 im Untersuchungsgebiet Grindelwald.

Insgesamt wirken die Varianzen der Jahres- und der Monatswerte nicht potentialvermindernd. Hingegen schränkt die Saisonalität einzelne Teilpotentiale stark ein.

8. PERSISTENZ

Die Persistenz ist definiert als Stabilität, Widerstandskraft oder Puffervermögen des Hydrosystems oder Teilen davon gegenüber Veränderungen von Einflussgrössen. Sie enthält eine diagnostische und prognostische Komponente. Mit der ersteren wird versucht die Stabilität des Systems auf der Basis von langjährigen Reihen zu ermitteln. Mit der prognostischen Komponente wird über eine Bezifferung der Belastbarkeit zusätzlich die zukünftige Entwicklung eines Systems abgeschätzt. Die prognostische Komponente basiert auf einer miteinbezogenen Raumanalyse und kann sich im Idealfall auf die diagnostische Beurteilung abstützen. Die Persistenz beinhaltet den Begriff der "Belastbarkeit". Mit der Belastbarkeit kann die Persistenz, falls von der Datenlage her möglich, beziffert werden. Sie ist zahlenmässig definiert als die Spanne zwischen der aktuellen und einem zu definierenden Schwellenwert unter Einbezug der potentiellen Gefährdung die sich aus der Raumanalyse ergibt. Als Schwellenwert können eine "ökologische Belastungsgrenze" und eine "politisch ökonomische Belastungsgrenze" unterschieden werden.

Die ökologische Belastungsgrenze wird hier definiert als die obere Grenze der natürlichen Grundwerte wie sie durch deren Variabilität gegeben ist. Die politisch-ökonomische Belastungsgrenze ist definiert als die der konventionellen Grenzwerte (gesetzliche). Als Beispiel können die Normen des schweizerischen Lebensmittelbuches gelten.

Die ökologische Belastbarkeit ist nach dieser Definition gleich null. Wir müssen uns für die vorliegende Arbeit auf diese Vereinfachung stützen, da es weder Aufgabe war, noch in den Möglichkeiten lag, ökologische Zustände und Gleichgewichte verschiedener Stufen zu definieren und zu untersuchen. Diese Frage wurde im Rahmen des MAB -Projektes aus theoretischer Sicht von GIGON (1981) eingehend behandelt.

Die konventionelle Belastbarkeit beziffert die verfügbare Kapazität zwischen der aktuell vorhandenen Belastung und dem politisch-ökonomischen, also dem konventionell festgelegten Grenzwert (Abb. 44). Als Beispiel kann die Nitratbelastung des Trinkwassers angeführt werden. Nach neuesten Normen gilt der Maximalwert von 40 mg/l für Trinkwasser. Bei Grundwerten von 0,3 - 3,0 mg/l in den Quellen Grindelwalds besteht eine kleine Belastung und eine sehr grosse Belastbarkeit in Bezug auf diese Komponenten. Die Persistenz (hydroökologische Be- Belastbarkeit) beinhaltet zusätzlich die raumimmamente Pufferkraft des Systems, welche als potentielle Gefährdung ausgedrückt wird.

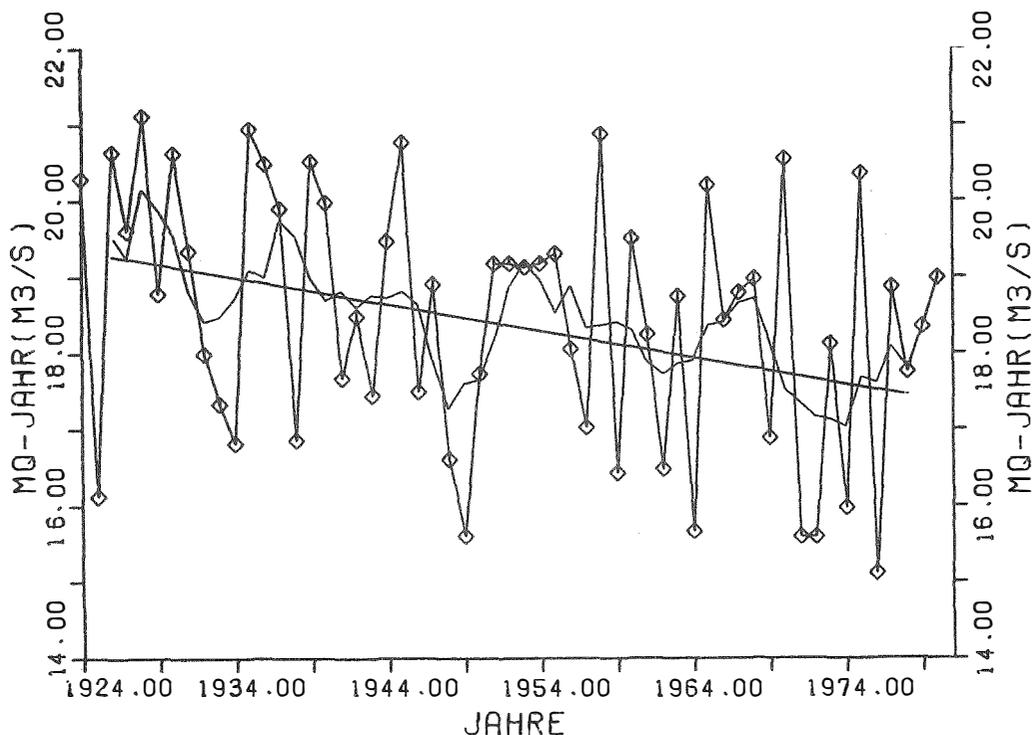


Abb. 44: Abfluss der Lütschine-Gsteig 1924-1980. Die Ganglinie der Jahresmittel ist mit Quadratsignatur belegt. Die Ganglinie des fünfjährigen gleitenden Mittels zeigt eine Abfolge von trockenen und nassen Jahren. Die Regressionsgerade ist auf das gleitende Mittel bezogen; $y=87,077-0,035x$, $r=0,737$, $b=0,544$.

So würden Nitratgehalte von 10 mg/l zwar noch weit innerhalb des Grenzwertes liegen, auf dem Hintergrund der räumlichen Grundwerte würden sie aber doch auf eine starke Gefährdung

der Wasserbeschaffenheit hinweisen. Oekologisch gesehen könnte ein solches Quellsystem bereits im Ungleichgewicht sein, d.h. die Abbaukapazität des Systems gegenüber dieser Komponente, wahrscheinlich damit auch weiteren, wäre überschritten. Die Persistenz eines solchen Systems wäre somit bereits herabgesetzt, wobei diese Verminderung nicht zahlenmässig beziffert werden kann.

Die Analyse der langjährig verfügbaren Wasserhaushaltselemente lässt in Bezug auf die **Stabilität** folgende Schlüsse zu:

Eine **Trendanalyse des Niederschlages** ergab keine signifikante Änderung des normalverteilten Jahresniederschlages in der Periode 1901-80.

Eine ähnliche Analyse kann für die **Verdunstung** mangels Daten nicht durchgeführt werden. Es darf aber angenommen werden, dass im langjährigen Geschehen für die Verdunstung ebenfalls keine signifikante Tendenz vorliegt. Die von KELLER (1951) berechnete Erhöhung der Verdunstung infolge intensivierter Pflanzenproduktion durch die Landwirtschaft, gilt nur für Fruchtfolgeflächen und ist im Raume Grindelwald nicht wirksam. Diese Folgerung wird gestützt durch die neuesten Untersuchungen von SCHAEGLER (1985), der zwar für grosse schweizerische Einzugsgebiete eine Zunahme der Verdunstung in den letzten 40 Jahren beobachten konnte, diese jedoch der landwirtschaftlichen Intensivierung zuweist und nicht einer Änderung der Klimaelemente.

Die Ganglinie des **Abflusses** der fünfjährigen gleitenden Mittel zeigt die **Abfolge von trockeneren und nasser Perioden** in der Grössenordnung von Pentaden oder Dekaden. Um gültige Mittelwerte zu erhalten, muss eine Messreihe demnach mindestens zehn Jahre aufweisen (vgl. Abb. 45).

Nach Untersuchungen des langjährigen Abflusses an der Station Lutschine-Gsteig zeigt der Abfluss aus dem stark ver-

gletscherten Einzugsgebiet (18%) der beiden Lütschinen einen negativen Abflusstrend (vgl. Abb. 44).

Die signifikante Abnahme (LEIBUNGUT 1984:275ff) der mittleren Abflussmengen im Alpenraum in den vergangenen Jahrzehnten scheint natürlicher Ursache zu sein. Die Wassermenge der Eismassen im schweizerischen Hochgebirge übersteigt den 100-fachen Wert aller Stauseen der Schweiz. Das Schmelzwasser könnte den Rhein bei Basel acht Jahre lang speisen.

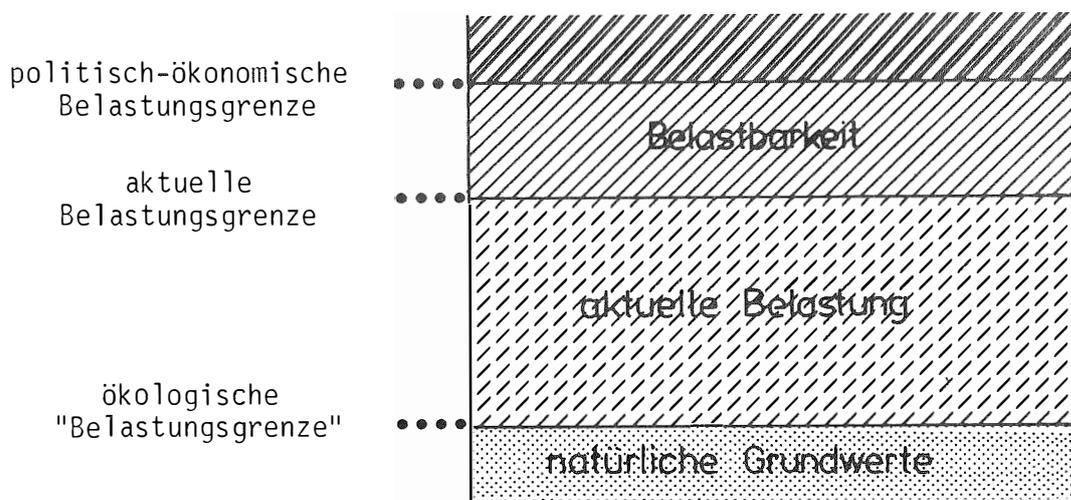


Abb. 45: Die Ermittlung der Belastbarkeit als Spanne zwischen der aktuellen Belastungsgrenze und der politisch-ökonomischen Belastungsgrenze.

Schwankungen im Akkumulations-Ablationsverhältnis in den Gletschern können somit durchaus bemerkbare und messbare Auswirkungen auf den Gerinneabfluss im alpinen Raum haben. Der gesamthaft starke Rückgang der **Alpengletscher** seit etwa 1850 ist bekannt. Die Gletscher im Aare- und Reussgebiet sowie im Rhoneeinzugsgebiet oberhalb des Genfersees, die hochgelegenen Nährgebiete und schmale Zungen aufweisen, haben in dieser Zeitspanne rund 20 Prozent ihrer Fläche verloren. Für die Gletscher des Rheingebietes bis zum Bodensee beträgt der Flächenverlust in der gleichen Zeit rund die Hälfte. Aus hydrologischer Sicht gilt es zu beachten, dass die Schrump-

fung fast ausschliesslich im Ablationsgebiet erfolgt und damit bei kleineren Eisvolumen auch kleinere Schmelzwasserraten anfallen. Der jährliche Schmelzwasserausfall beträgt im Mittelland rund 1425 Mio. m³. Dies entspricht rund 40 m³/s oder rund 5 Prozent der aus dem Alpenraum abfliessenden Wassermengen. Die Temperatur als bestimmende Grösse für den Gletscherabfluss ist bis 1950 systematisch angestiegen und hat damit den Gletscherschwund bewirkt. Der Mittelwert der mittleren jährlichen Flächenabnahme um 4,9 km²/Jahr beträgt für die Periode 1876 - 1934 denn auch nur 4,5 km², hingegen für die Periode 1934 - 1973 5,5 km². Die Flüsse erhielten damit einen Anteil Wasser aus der Reservezehrung der Gletscher. Der Abfluss liegt über den Wassermengen aus der Differenz Niederschlag - Verdunstung. Dabei sind der intensivere Schmelzvorgang und Arealverlust gegenläufige Vorgänge, die sich teilweise aufheben. Eine dauernd gleichbleibend hohe Wasserführung der Flüsse ist nur möglich, wenn die Temperatur im Mittel über längere Zeit ansteigt. Diese Aufwärtsbewegung hat ab etwa 1950 aufgehört. Die Abflussmengen werden zurückgehen bis sie wieder etwa den Niederschlägen entsprechen.

Am Beispiel des Gornergletscherabflusses kann die Entwicklung verfolgt werden. Dem stationären Zustand für die Niederschlagsverhältnisse in der Periode 1902 - 1940 entsprechen 90 Mio m³/a. In der Periode 1921 - 1934 sind 115 Mio. m³/a abgeflossen und im (warmen) Jahre 1949 waren es 160 Mio. m³/a. Sollten die Temperaturen fallen, müsste die Abflussmenge unter 90 Mio. m³/a fallen. KASSER (1959) prognostizierte bereits damals eine Abnahme der Wassermengen in der Rhone bei Port du Scex aus den ausgeführten Gründen. Die Resultate der neuen Datenanalysen bestätigen dies.

Gesamtschweizerische Betrachtungen der Abflussmengen im langjährigen Geschehen ergaben Hinweise auf einen Trend zur Abflusszunahme in mittelländischen Einzugsgebieten, zur Abflussabnahme in alpinen stark vergletscherten Gebieten und zu stationären Verhältnissen in "Voralpengebieten" (LEIBUNDGUT 1984:273ff). Das Untersuchungsgebiet Grindelwald ohne

Vergletscherung müsste in diesem Zusammenhang diesem "Vor-
alpengebiet" zugerechnet werden. Es darf somit dafür die be-
reits postulierte Stabilität angenommen werden.

Die zu erwartende weiterhin dauernde Abnahme der Gletscher-
zuflüsse ins Untersuchungsgebiet hat auf das mengenmässige
Potential des Raumes Grindelwald im Blick auf die Fragestel-
lung keinen Einfluss. Hingegen kann eine kleinere Vorfluter-
menge in der Lüttschine bei der Entsorgung der Abwässer Nach-
teile aufweisen.

Die Lüttschinezuflüsse der Seitenbäche und der Gletscher
weisen einen PO_4 Wert ($0,015 \text{ mg/l}$) auf, der etwa den heu-
tigen natürlichen Grundwerten gleichgesetzt werden darf. Die
abwasserbedingten zeitweise hohen P-Konzentrationen im Lüt-
schinenabfluss werden entsprechend des im Jahresverlauf
stark ändernden Abfluss mehr oder weniger verdünnt. Da die
Niedrigwasserzuflüsse aus den Gletschergebieten stabil blei-
ben sollten, dürfte sich die Wintersituation bei gleichblei-
bendem Phosphoreintrag kaum weiter verschlechtern. Die heute
noch relativ günstige Sommersituation dürfte sich jedoch
verschlechtern. Die Pufferung ist fast ausschliesslich durch
die Verdünnung gegeben, da über Mikroorganismen im kalten
Wasser nur sehr wenig abgebaut wird. Es darf nicht darüber
hinweggesehen werden, dass sich trotz des in der Zwischen-
zeit erfolgten Baus der ARA, der Phosphoreintrag nicht ent-
scheidend ändert.

Die eventuelle Infiltration von belastetem Lüttschinewasser
ins Grundwasser ist für das Untersuchungsgebiet nicht rele-
vant, da die Infiltration erst unterhalb der Grundwasser-
fassung erfolgt.

Der oberirdische Abfluss ist mengenmässig über die Landnut-
zung zwar beeinflussbar. Zusammen mit den natürlichen Ein-
zugsgebietsfaktoren prägt die Landnutzung grundsätzlich den
Oberflächenabfluss in entscheidender Weise mit. Wie weit
dies auch für die alpinen Einzugsgebiete in Grindelwald
gilt, wurde in einer Detailstudie zum Oberflächenabfluss von

ASCHWANDEN (1982) untersucht. Aus praktischen Gründen musste die Fragestellung auf die Untersuchung des Abflussverhaltens von Sommerniederschlägen in Abhängigkeit der Landnutzung eingeschränkt werden.

In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe eines Raumgliederungsverfahrens fünf Teileinzugsgebiete ausgewählt. Diese mussten je einen unterschiedlichen Landnutzungstyp repräsentieren, was durch eine Rangkorrelationsanalyse nach SPEARMAN bestätigt wurde. In den Testgebieten wurden im Herbst 1979 ein Niederschlag-Abfluss-Messnetz errichtet und in der Folge vom März bis Dezember 1980 betrieben. Für die fünf Teileinzugsgebiete wurde schliesslich ein mittlerer "Unit Hydrograph" berechnet und den Einzugsgebietsfaktoren gegenübergestellt.

Die Ganglinienanalyse ergab, dass die relativ kleinen und steilen Einzugsgebiete dieses alpinen Raumes sehr schnell auf Niederschläge ansprechen. Die Abflusswellen sind gekennzeichnet durch kurze Scheitelanstiegszeiten und durch eine geringe Gesamtlänge.

Der **Spitzenabfluss** wird sehr stark durch die Landnutzung beeinflusst. Wald und Grasland als Flächen mit geringer Abflussbereitschaft dämpfen die Maximalabflüsse und verlängern den Abflussvorgang. Weideflächen dagegen sind schnell abflussbereit und abflussintensiv.

Der **Abflussfaktor** ist mit Ausnahmen im Allouwinenbach erstaunlich klein. Die **Landnutzung** scheint auf seine Grösse **keinen Einfluss** zu haben. Die begleitende Untersuchung der Schwebstofffrachten zeigte an, dass für den Bodenabtrag die Schneeschmelze eine grössere Rolle spielt als die sommerlichen Niederschlagsereignisse.

Eine denkbare starke Entwicklung des Massentourismus in Grindelwald mit zunehmender punktueller, linien- und flächenhafter Teil- und Vollversiegelung müsste sich nach den Resultaten dieser Untersuchung dahin auswirken, dass der

Oberflächenabfluss gesamthaft schneller erfolgt und der Bodenabtrag verstärkt wird. Die gleiche Tendenz würde auftreten, wenn die Landwirtschaft grössere Flächen im Bereich der heutigen Mähwiesen zukünftig als Weideland nutzen würde.

Es könnten sich über die Wirkungskette Abflussbeschleunigung - Erosion - Änderung der Versickerungsbedingungen auch Veränderungen im Hydrosystem ergeben.

Das Hydrosystem weist als Ganzes eine hohe Persistenz auf. Darin sind die Wasserhaushaltselemente Niederschlag und Verdunstung anthropogen kaum beeinflussbar. Beide Elemente weisen im langjährigen Geschehen keine Trends auf (vgl. Kap. 7). Bezüglich der Fragestellung ist die Persistenz der Wasserhaushaltsglieder oberirdischer Abfluss und Quellwasser entscheidend.

Aus dem Vergleich der Entwicklung von Niederschlag und Abfluss darf gefolgert werden, dass auch der Quellabfluss über längere Zeit stabil bleibt (vgl. Abb. 43).

Die Persistenz des auf 50 l/s bis 25 l/s veranschlagten **Trinkwasser-Potentials** in Form der minimalen Quellschüttungen Ende des Winters ist **sehr hoch**. Dies weil eine grössere Varianz als sie den Betrachtungen zugrunde gelegt ist (vgl. Kap. 7) auszuschliessen ist. Eine einzige Einschränkung muss bezüglich einer möglichen, sich langfristig auswirkenden Verschmutzung des Quellwassers gemacht werden, wenn die nötigen Schutzmassnahmen nicht rechtzeitig und wirkungsvoll durchgeführt werden (vgl. Kap. 6.3.2 bis 6.3.7).

Ueber eine Weiterführung des flächendeckenden Modells "HYPOT" kann der Einfluss der landwirtschaftlichen Nutzung auf die Wasserqualität untersucht werden. Diese Teilstudie wurde in einer von SCHEURER durchgeführten Beurteilung im Rahmen einer UVP gemeinsam erarbeitet. (MESSERLI et al. 1986).

Zur Beurteilung des Einflusses der landwirtschaftlichen Nutzung auf die Qualität des Grund- und Quellwassers und dadurch deren indirekten Bedeutung für die Wasserversorgung, betrachteten wir

- die Art und Intensität der Bewirtschaftung
- die Pufferwirkung des Bodens
- die Pufferung des Grundwasserspeichers.

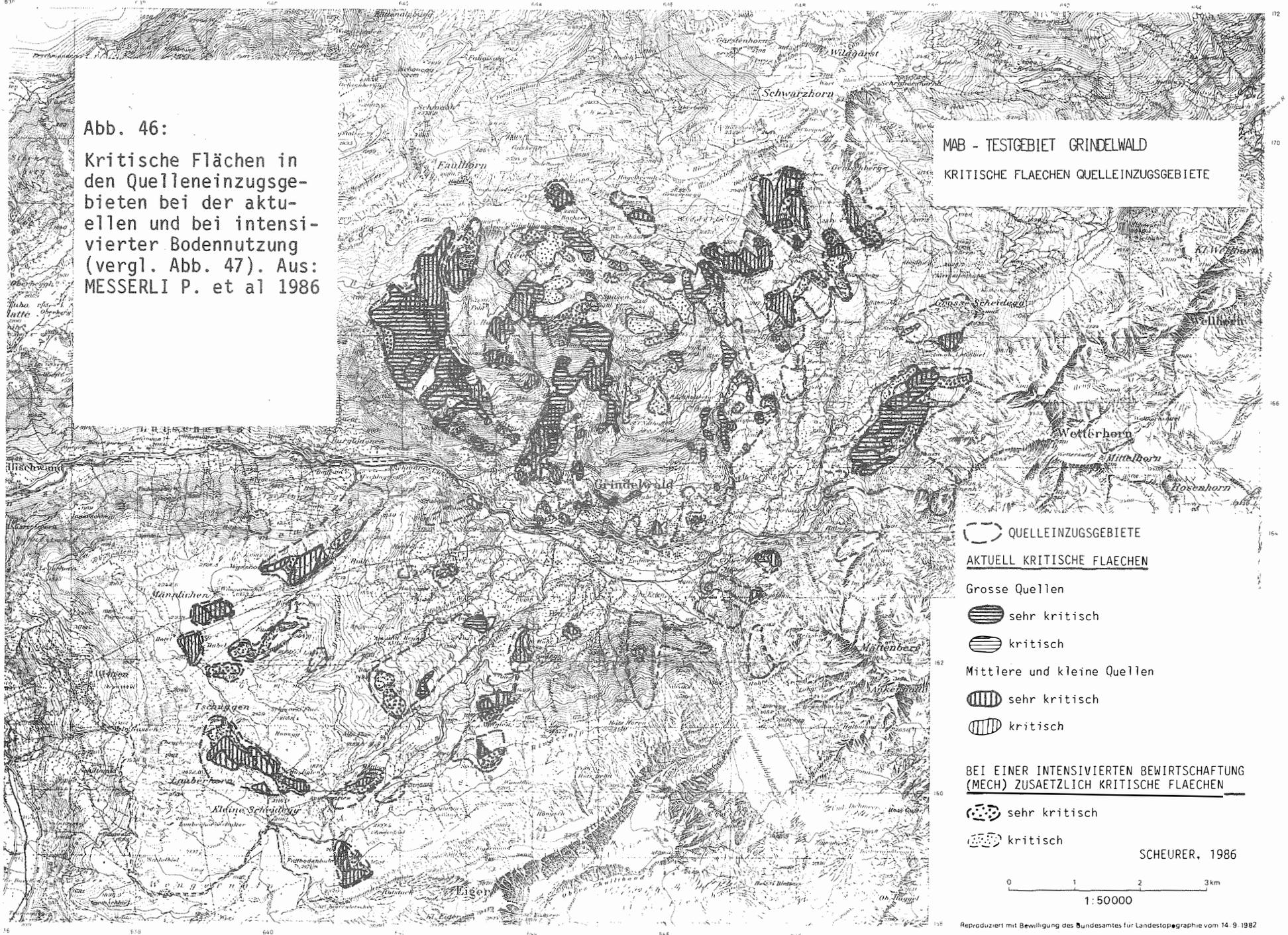
Um die Gefährdung der Quellen (räumlich: der Quelleinzugsgebiete) zu erfassen, werden in einem ersten Schritt die Pufferung der Quellschüttung (über die Durchlässigkeit des Grundwassersspeichers und den jährlichen Quellschüttungsverlauf) und die Pufferung der Bodendecke (über die Durchlässigkeit und die Mächtigkeit des Bodens) beurteilt. Daraus lässt sich eine potentielle, naturräumlich bedingte Gefährdung der Flächen eines Quelleinzugsgebietes bestimmen, welcher sodann der Nutzungseinfluss überlagert wird.

Die Gefährdung durch die Bewirtschaftung ist bei der Beweidung grundsätzlich höher als bei der Mähnutzung, da durch die tierischen Fäkalien das Sickerwasser bakteriologisch verunreinigt werden kann. Bei der Mähnutzung hängt die Gefährdung von den verwendeten Düngemitteln ab. Die grösste Gefährdung ist durch Gülleeinsatz gegeben. Da diese aufgrund der heutigen Betriebsführung nicht verwendet wird, braucht eine Beurteilung nicht vorgenommen zu werden. Ähnliche Auswirkungen (auf die bakteriologische Beschaffenheit des Quellwassers) wie die Beweidung kann die Ausbringung von Hofdünger (Mist) bewirken, wogegen durch Handelsdünger "nür" die chemische Beschaffenheit verändert wird. Bei der Bewirtschaftung von Dauerwiesen sind jedoch die Belastungen gering. Sie können als in der Regel nicht oder wenig gefährdend beurteilt werden.

Aufgrund dieser Vorgaben kann die Gefährdung für jede Einheitsfläche der erfassten Quelleinzugsgebiete berechnet werden. Von Interesse sind im folgenden die als sehr kritisch

Abb. 46:

Kritische Flächen in den Quelleneinzugsgebieten bei der aktuellen und bei intensiverter Bodennutzung (vergl. Abb. 47). Aus: MESSERLI P. et al 1986



MAB - TESTGEBIET GRINDELWALD
KRITISCHE FLAECHEINZUGSGEBIETE

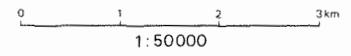
QUELLEINZUGSGEBIETE
AKTUELL KRITISCHE FLAECHEIN

- Grosse Quellen
- sehr kritisch
- kritisch
- Mittlere und kleine Quellen
- sehr kritisch
- kritisch

BEI EINER INTENSIVIERTEN BEWIRTSCHAFTUNG (MECH) ZUSAETZLICH KRITISCHE FLAECHEIN

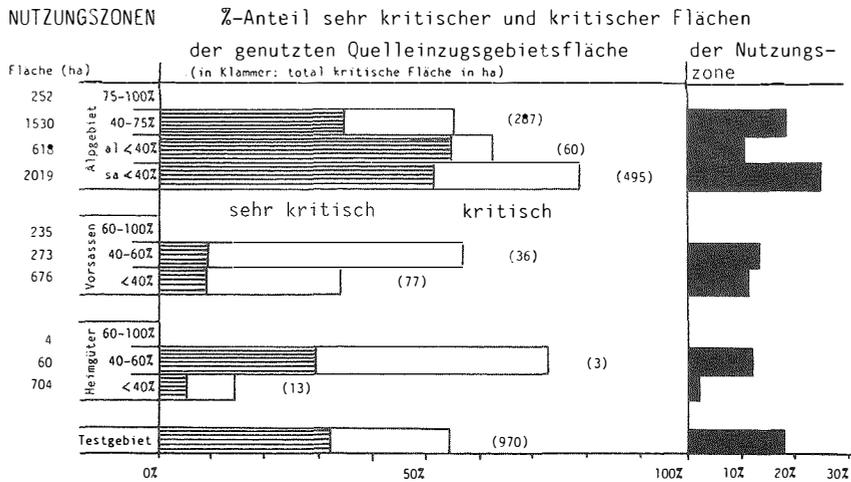
- sehr kritisch
- kritisch

SCHEURER, 1986

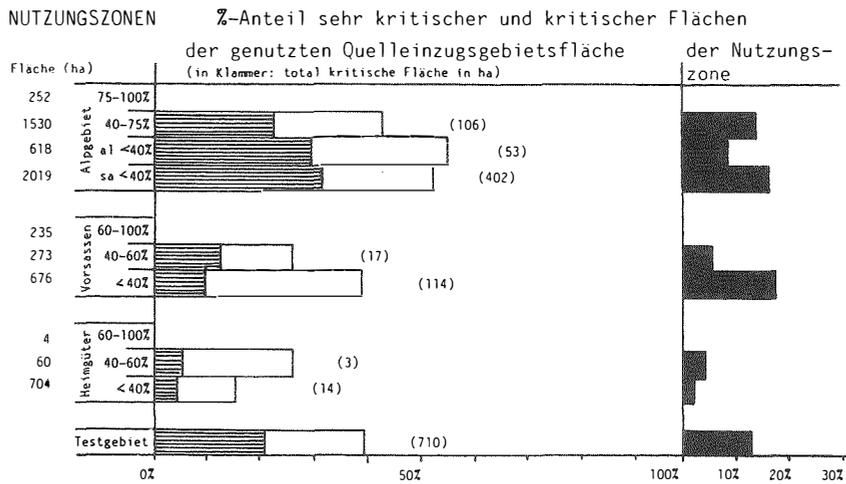


Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 14. 9. 1982

a: Bei einer intensivierten Bewirtschaftung gefährdete Flächen



b: Aktuell gefährdete Flächen



c: Bei einer extensivierten Bewirtschaftung gefährdete Flächen

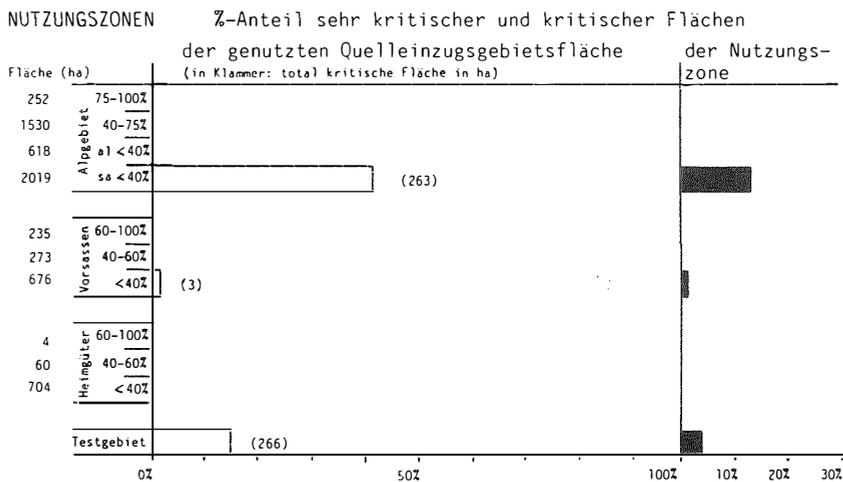


Abb. 47: Der Anteil kritischer und sehr kritischer Flächen der genutzten Quell-Einzugsgebietsflächen an den einzelnen Nutzungszonen bei verschiedener Bewirtschaftung. Aus: MESSERLI P. et al 1986

und als kritisch beurteilten Flächen. Diese Flächen weisen eine geringe Pufferung, und/oder einen stark gefährdenden Nutzungsinput auf.

Die Quelleinzugsgebiete (aller erfassten Quellen) Grindelwalds umfassen rund 1800 ha (z.T. überlagernd), davon sind heute rund 1400 ha landwirtschaftlich genutzt. Rund 400 ha liegen im Talgutbereich und rund 1000 ha im Alpbereich. Von der heute bewirtschafteten Quelleinzugsgebeitsfläche weisen rund 700 ha (704 ha) eine erhöhte Gefährdung auf. Diese unter dem heutigen Nutzungseinfluss als sehr kritisch und kritisch beurteilten Flächen liegen, wie in Abbildung 46 dargestellt, grösstenteils im Alpbiet der Firstseite. Die Verteilung der heute kritischen Flächen über die Nutzungszonen zeigt Abbildung 47:

- Die kritischen Flächen des Talgutbereiches liegen im wenig geneigten und deshalb intensiv genutzten Vorsassengebiet. Es sind in der Regel Einzelflächen, einzig im Gebiet der Quelle Bachhalten ist eine grössere zusammenhängende Fläche betroffen
- Im Alpbereich weisen vor allem Quelleinzugsgebiete, welche regelmässig beweidet werden, einen bedeutenden Anteil kritischer Flächen auf der Firstseite und hier ausgeprägt in verkarsteten oder nur gering bodenbedeckten, jedoch stark beweideten Gebieten auf. Am stärksten gefährdet sind die Gebiete im Bereich der Läger, dies besonders auf den Alpen Buessalp, Bach und Scheidegg (vgl. Abb. 46).

Die Differenzierung nach Quellgrösse zeigt, dass

- die grossen Quellen vor allem im Vorsassengebiet und im regelmässig beweideten Alpbiet gefährdet sind,
- die mittleren Quellen (200 - 800 l/min) vor allem im Alpbiet gefährdet sind und

- die kleinen Quellen überall, jedoch nirgends durch einen besonders hohen Anteil kritischer Flächen gefährdet sind.

Betrachten wir den relativen Prozentanteil der sehr kritischen und kritischen Flächen an der genutzten Quelleinzugsgebietsfläche nach Nutzungszonen (vgl. Abb. 47), zeigt sich abgeschwächt die oben erwähnte Beurteilung.

Ueber die Annahme von Szenarien können mit Hilfe des Modells fiktive, zukünftige Zustände simuliert werden. Durch eine intensivere Bewirtschaftung der geeigneten Flächen (Szenarium MECHANISIERUNG) nimmt der Anteil der kritischen Flächen im Talgutbereich vor allem in den intensivierten randlichen Standorten (Gebiete mit 40% bis 60% Hangneigung) zu (MESSERLI et al. 1986). Dagegen ist in den vermehrt gemähten Vorsassengebieten eine Abnahme festzustellen. Im Alpgebiet wirkt sich die Intensivierung durchwegs negativ aus, insbesondere in den bisher eher extensiv beweideten Standorten. Zudem nimmt auch auf der Männlichenseite der Anteil der gefährdeten Flächen zu.

Durch eine extensivere Bewirtschaftung (Szenarium MINIMUM) wird die heutige Situation durchwegs entschärft, indem nur noch im Alpgebiet rund ein Drittel der Quelleinzugsgebietsfläche als kritisch beurteilt werden und sehr kritische Flächen wegfallen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bereits durch die heutige landwirtschaftliche Nutzung die Qualität des Grundwassers vor allem der in den verkarsteten Alpweidegebieten gelegenen Quelleinzugsgebieten stark gefährdet ist. Dieses (Modell)-Ergebnis bestätigen die durchgeführten Wasseranalysen. Weitergehende Probleme ergeben sich vor allem bei einer Intensivierung der Weidewirtschaft einerseits auf den nicht für Mähen geeigneten Flächen im Talbereich sowie allgemein im Alpgebiet wo vor allem die noch intensivierbaren Standorte besonders gefährdet sind (Bachalp, z.T. Itramen und Grindel).

Von den für die heutige Wasserversorgung bedeutenden Quellen (Tuft, Schattenhalb, Klecki, Bachhalten, GW Gryth) ist besonders Bachhalten gefährdet. Während die kritischen Flächen in den Einzugsgebieten der Quellen Klecki und Tuft nicht unmittelbar gefährdend wirken. Anggistalden, eine weitere Quelle mit einer grossen Schüttung konnte aus Qualitätsgründen bis heute nicht gefasst werden (Einzugsgebiet Buessalp). Man kann heute davon ausgehen, dass bei einer weiteren Zunahme der Wassernachfrage die Wasserversorgung Grindelwalds - vor allem zur Abdeckung der winterlichen Tagesspitzen - auch mittlere und kleinere Quellen miteinbeziehen wird. Aus diesem Grund muss auch diesen Quellen Beachtung geschenkt werden.

Ein **Schutzzonenkonzept** für Quellen muss, aufgrund des bisher gesagten, für heute gefährdete Quelleinzugsgebietsflächen vor allem Auflagen bezüglich einer intensiven Weidenutzung (und eventuell der Gülle und Klärschlammdüngung) enthalten. Im weiteren gilt es, auch Einzelflächen mit Nutzungsaufgaben zu belegen, insbesondere wenn diese intensiv beweidet werden.

Nach dem heutigen Stand der Kenntnisse ist die Belastbarkeit im Raume Grindelwald bezüglich der mittleren Wassermengen sehr gross, da diese über eine flächenhafte Nutzung anthropogen nicht entscheidend beeinflussbar sind. Hingegen dürften die Quellwasserspeicher unter anderem infolge der Hanglage punktuell sehr verletzlich sein (Tiefbauten). Bezüglich der Wasserqualität ist die Belastbarkeit gesamthaft relativ gering. Die Eigenschaften der Raumausstattung verhindern allgemein eine wirksame Regeneration verschmutzten Wassers.

9. WISSENSCHAFTLICHE SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorrangige Nutzung des Wassers im Raum Grindelwald ist die Trinkwassernutzung. Auch sie wird, wie andere Wassernutzungen im Alpenraum, zunehmend durch weitere Nutzungen konkurrenziert. Insbesondere die Landwirtschaft mit dem Anspruch nach intensivierter Nutzung und des Tourismus stehen in Opposition zur Wassernutzung. Der Tourismus schafft Bedürfnisse, wie beispielsweise extrem hohen Wasserbedarf, der den Schutz- und Erhaltungsbestrebungen zuwiderläuft.

Die durch Nutzungsänderungen (Impulse) im Naturraum ausgelösten Reaktionen können zu Ungleichgewichten führen, die als ökologische Störungen bekannt sind. Solange die Regenerationskräfte der natürlichen Teilsysteme ausreichen, können diese Ungleichgewichte zu neuen Gleichgewichten auf veränderten Stufen ausgeglichen werden (Abb. 48).

Die Auswirkungen sind oft schwer erfassbar, da die harten Daten fehlen und die ökologische Betrachtungsweise zu jung ist. Eine Beweisführung in naturwissenschaftlicher Exaktheit ist oft undurchführbar. Allerdings stehen heute halbquantitative Bewertungsverfahren (Bsp. Ansatz Hydroökologie) zur Verfügung die besonders in gesamtheitlichen Betrachtungen, die auch sozio-ökonomische Belange miteinbeziehen, mithin bessere Dienste leisten als rein naturwissenschaftliche Betrachtungen mit beschränktem Anwendungsradius.

In methodischer Hinsicht darf der gewählte hydroökologische Ansatz als brauchbares und im vorliegenden Falle als zum Erfolg führendes Vorgehen bezeichnet werden. Die gestellten Fragen nach dem Potential, der Varianz und der Persistenz konnten in der kurzen vom Projekt her gegebenen Zeit, befriedigend beantwortet werden. Bei diesem Vorgehen kommt der Vorerkundungsphase entscheidende Bedeutung zu. Hier fallen

die Entscheidung über die Hauptelemente und die Untersuchungsplanung und damit weitgehend über Erfolg und Misserfolg der gesamten Untersuchung. Eine falsche Wahl der Hauptelemente oder ein falsch konzipiertes Messnetz wären kaum mehr gutzumachende Fehler. Das von uns praktizierte Vorgehen, neben der Aufarbeitung der vorhandenen Daten und Kenntnisse und der Erfassung der grundlegenden Größen des Wasserhaushaltes, auch mit kurzen Messkampagnen, nötige Schlüsselgrößen

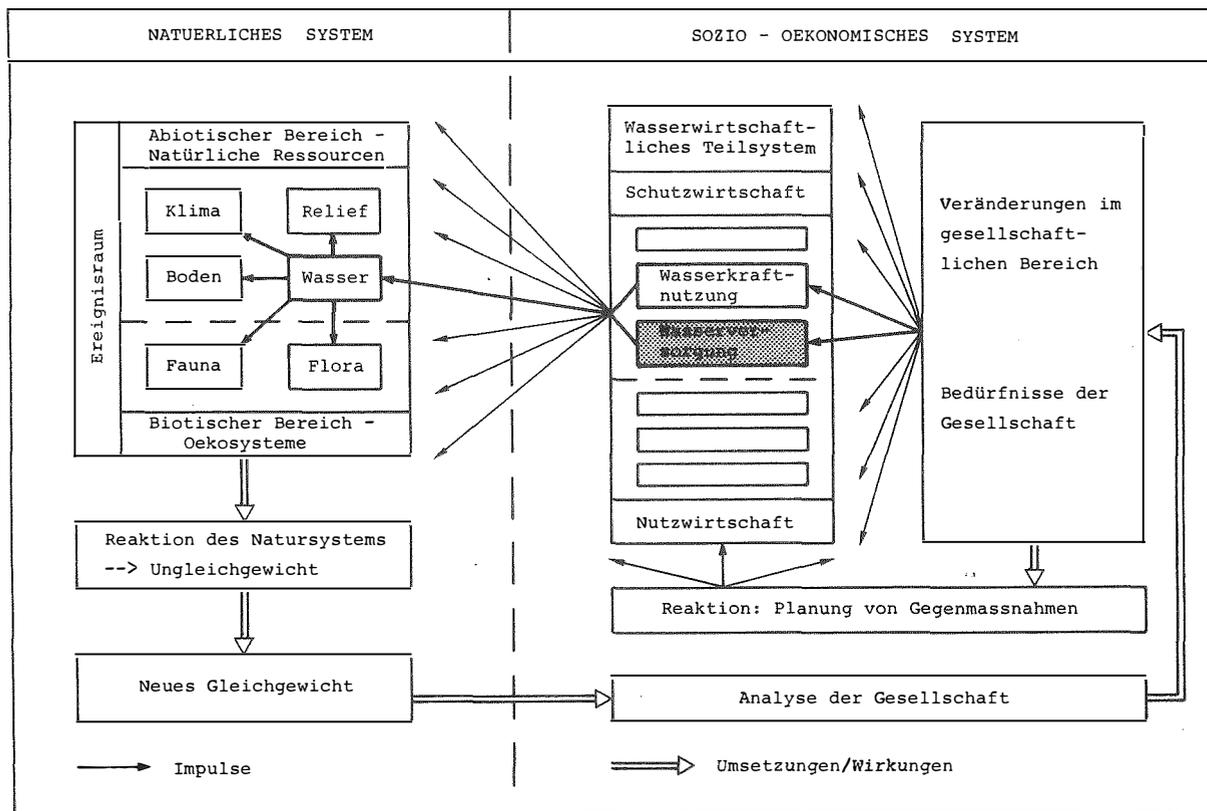


Abb. 48: Impuls-Wirkung-System am Beispiel der Wasserversorgung.

in angepasster zeitlicher und räumlicher Verteilung zu ermitteln, hat sich bewährt und sollte in Zukunft verstärkt betrieben werden. Wie beschrieben werden dabei sowohl Parameter der Wassermengen als auch solche der Wasserqualität berücksichtigt. Als **Schlüsselparameter** werden generell erho-

ben: Abfluss- bzw. Schüttungsmenge, Temperatur, Leitfähigkeit und ausgewählte chemische Parameter (häufig Natrium und Calcium, Magnesium) dazu wird versucht, einen Einblick in die isotopischen Verhältnisse der jeweiligen Wässer zu gewinnen. Damit lassen sich mit dem Konvergenzansatz unter Einbezug einer detaillierten Raumanalyse hydrologische Modelle formulieren.

Durch die Entwicklung der Feldmethoden ist in den letzten Jahren eine wesentliche Verbesserung der messtechnischen Seite erfolgt. Die Datenerfassung im Gelände ist für einzelne Parameter heute schneller, sicherer und präziser. In einzelnen Bereichen ist sie bereits durch Mikroprozessoren unterstützt, die eine Datenauswertung direkt im Felde erlauben. Die Arbeiten in Grindelwald haben wesentliche Impulse für eigene Entwicklungen auf diesem Gebiet gegeben. Die Untersuchung von Einzelereignissen zur Erfassung der prinzipiellen Abfluss- und Speichermechanismen ist der vorläufige Endpunkt in dieser Entwicklung.

Es mag auf den ersten Blick erstaunen, dass bei diesem Vorgehen der Erfassung des Wasserhaushaltes ein bedeutendes Gewicht zuerkannt wurde. Dies umso mehr als dieser Arbeitsteil relativ aufwendig ist. Die Erfassung der Wasserhaushaltsgrößen ist zur Absicherung und Kontrolle unerlässlich. Ebenso müssen diese Größen zur Bestimmung der Systemvarianz und zur Uebertragung der Untersuchungsergebnisse auf andere Räume bekannt sein. Durch den Ausbau der Basismessnetze durch die zuständige Organisationen auf Bundesebene (MZA, Landeshydrologie) wird diese Aufgabe in Zukunft erleichtert. Allerdings wird in neueren Untersuchungen doch bereits auf eigentliche Bilanzierungen zugunsten eines verstärkten Einsatzes des Konvergenzverfahrens verzichtet. Die Gewichtung der beiden Arbeitsteile ist von Fall zu Fall festzulegen.

Die Methodik der detaillierten Untersuchung der Hauptelemente richtet sich selbstverständlich nach den jeweiligen Hauptelementen. Sind diese im Bereiche Grundwasser oder oberirdischer Abfluss angesiedelt eignet sich der Konver-

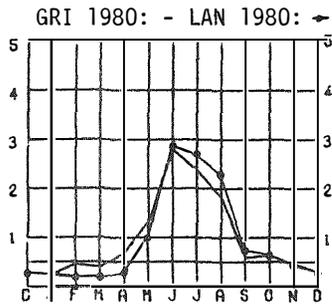
genzansatz. Andere mögliche Hauptelemente wie beispielsweise das Bodenwasser würden andere Ansätze erfordern.

Die Forderung nach flächendeckenden Aussagen bleibt vorläufig ein Problem für das kein allgemeingültiger Lösungsweg angegeben werden kann. Während bei den hydrometeorologischen Elementen Niederschlag und Verdunstung über die Interpolation der Punktmessungen eine Flächendeckung erzielt werden kann, ist dies bei den Grössen Abfluss und Grundwasser nicht möglich. Die Inhomogenitäten der Einzugsgebiete (Boden- und Untergrundbeschaffenheit) sind zu gross. Es sind bis heute noch keine allgemeingültigen Wege gefunden worden, um die hochentwickelten Modelle aus kleinen Einzugsgebieten in Untersuchungsräume planungsrelevanter Dimensionen zu übertragen. Das hier angewendete Verfahren des Konvergenzansatzes zeigt jedoch brauchbare und ausbaubare Möglichkeiten auf.

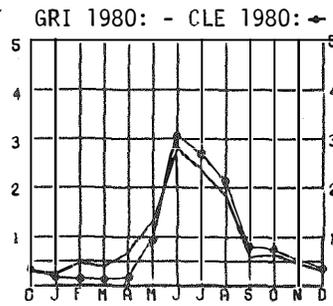
Im Einheitsflächenmodell wird neugebildetes Grundwasser mit Hilfe von zwei Modellkomponenten bewertet. Aus den Daten der Flächennutzung, des Düngeraustrages und der Gebäudenutzung wird die Güte des Sickerwassers abgeschätzt (Teilmodell QUSI) und aus den Bodenkennwerten wird die Reinigungswirkung des Bodens abgeleitet (Teilmodell REWI).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Anwendung des flächendeckenden hydrologischen Modells im Bereich der Wasserqualität im wesentlichen zu plausiblen Ergebnissen führt. Es bleiben jedoch erhebliche Unsicherheiten bestehen, da das Modell nicht oder nur ungenügend anhand von Messdaten geeicht werden konnte.

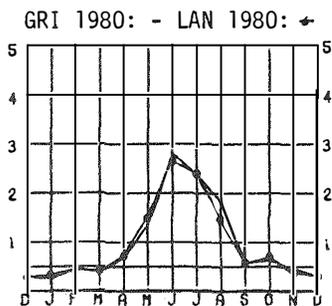
Die Lösung der gestellten Aufgabe über das Einheitsflächenmodell HYPOT ist keine allgemeine Lösung, da die nötigen Datengrundlagen in den meisten anderen Fällen fehlen dürften. Immerhin zeigt sich die spezielle Bearbeitung des Modells mit eingengter Zielsetzung, dass doch verlässliche Aussagen möglich sind.



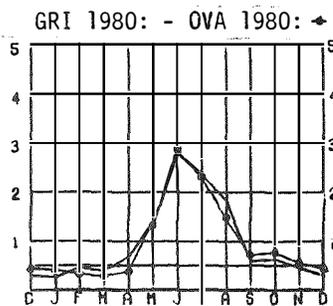
Landwasser



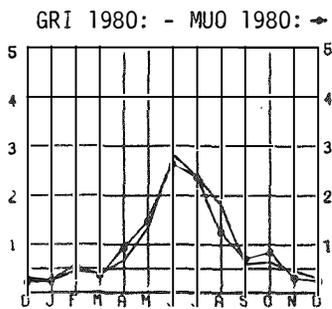
Clemgia



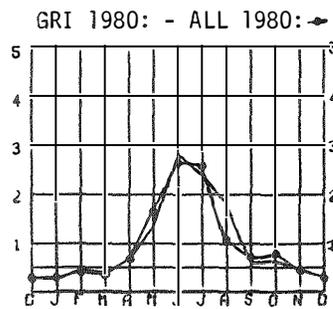
Landquart



Ova dal Fuorn



Muota



Allenbach

Abb. 49: Uebertragung von Abflussregimes am Beispiel der Lüttschine-Schwendi (GRI 1980) auf andere nivale Einzugsgebiete. Die übertragenen Werte sind mit den effektiv gemessenen Werten verglichen. Lüttschine-Schwendi enthält nur den Abfluss aus dem Untersuchungsgebiet.

Die Uebertragbarkeit der Erfahrungen aus dem Grindelwald-Projekt ist weitgehend gegeben. So ist die Methodik der Hydroökologie auf andere Gebiete anwendbar. Die nötigen Anpassungen an die jeweiligen örtlichen Verhältnisse dürfen vom Bearbeiter verlangt werden. Mit der grundsätzlich gleichen Methodik sind Projekte in Kenya, in Griechenland und im Alpsteingebiet in Bearbeitung.

Die hydrologischen Resultate der Untersuchung in Grindelwald sind in ihrer grundsätzlichen Aussage ebenfalls übertragbar. Für ähnliche Untersuchungen können die Niederschlags- und Verdunstungswerte über die langjährigen Reihen der Basis-messnetze eventuell durch Stützpunktmessungen ergänzt, bestimmt werden (LEIBUNDGUT 1985).

Für die Uebertragung der oberirdischen Abflüsse steht heute die Abflussregimetypisierung der Schweiz (ASCHWANDEN und WEINGARTNER 1985) zur Verfügung. Auf deren Grundlage können Abflüsse in nichtgemessenen Gebieten in Jahres- und Monats-mitteln recht zuverlässig abgeschätzt werden. So können beispielsweise für 1980 die Abflüsse aus dem Untersuchungsgebiet mit Abflüssen aus anderen Einzugsgebieten, die auch den nivalen Regimetyp zugehören, bestimmt werden (Abb. 49). Der Vergleich mit den effektiv gemessenen Werten zeigt die Tauglichkeit des Verfahrens und zwar unabhängig von der räumlichen Lage der Einzugsgebiete. Diese Arbeiten, obwohl eigenständige NF-Projekte, sind Beiträge an die hier behandelte Problematik, die unter anderem durch das Projekt MAB-Grindelwald angeregt worden sind.

Für den Bereich Grund- und Quellwasser gilt der Mechanismus, dass im Alpenraum die Speicher während der Schneeschmelze vollständig aufgefüllt werden. Dies unabhängig vom Niederschlagswert des betreffenden Jahres. Es gilt somit in erster Linie die Auslauffunktion der interessierenden Quellwasserspeicher, bzw. Aquifere zu ermitteln. Bei richtiger Versuchsanordnung ist der Aufwand vertretbar.

L i t e r a t u r

- ASCHWANDEN H. (1982): Niederschlag und Abfluss dargestellt an fünf Teileinszugsgebieten der Lütchine im Raum Grindelwald. Diplomarbeit Geographisches Institut Univ. Bern.
- ASCHWANDEN H. + WEINGARTNER R. (1985): Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde Nr. 76. Geographisches Inst. Univ. Bern.
- ASCHWANDEN H., WEINGARTNER R., LEIBUNDGUT CH. (1986): Zur regionalen Uebertragung von Mittelwerten des Abflusses. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen (DGM), 30.Jh., Heft 2/3, 52-61.
- ATTMANNSPACHER W. (1976): Radarmessungen zur Bestimmung von Flächenniederschlägen. In: Die Naturwiss., 63, 313-318.
- BAUMANN CH. (1981): Die Wasserversorgung von Grindelwald; ein Beitrag zum Projekt eines Wasserreservoirs beim Steintor. In: Echo von Grindelwald Nr. 106, Grindelwald.
- BENISCHKE R. + HARUM T. (1985): Computergesteuerte Abflussmessungen in offenen Gerinnen nach der Tracerverdünnungsmethode (Integrationsverfahren). In: Steir. Beitr. z. Hydrogeologie 36, 127-137, Graz.
- BINGGELI V. (1974): Hydrologische Studien im zentralen schweizerischen Alpenvorland, insbesondere im Gebiet der Langeten. Beiträge zur Geol. der Schweiz - Hydrologie, Nr. 22. Schweiz. Geotechn. Komm. und Hydrol. Komm. SNG, Kümmerly + Frey, Bern.
- BOLLIGER H.J. (1981): Zur Hydrologie der Quellen im Raume Grindelwald. Diplomarbeit Geographisches Inst. Univ. Bern.
- DERVEY A. (1981): Karsthydrographische Kartierungen im Raume Grindelwald. Hausarbeit Geographisches Inst. Univ. Bern.
- EIDG. DEPARTEMENT DES INNERN (1979): Nitrat im Trinkwasser; Lagebericht. Bern.
- FELBER H.U. (1982): Hydrologische und hydrogeographische Untersuchungen im alpinen Raum Grindelwald (Schweiz). Diss. Geographisches Inst. Univ. Bern.
- FELBER H.U. (1983): Ergänzender Rapport zum Schlussbericht "Hydrologie Grindelwald". Geographisches Inst. Univ. Bern.
- FISCHER M. (1982): Abflussmessungen mit Tracern nach dem Verdünnungsverfahren. In: Beitr. z. Geologie der Schweiz - Hydrologie, Nr. 28, Teil II, 447-458, Kümmerly + Frey, Bern.

- FOEHN P. (1978): Schneeverdunstung im alpinen Gelände. In: Beitr. zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, Nr. 25, 35-42, Schweiz. Geotechn. Komm. und Hydrol. Komm. SNG, Kümmerly + Frey, Bern.
- GEOLOG. ATLAS DER SCHWEIZ 1:25'000, Blatt 396, Grindelwald. Geolog. Komm. SNG, Zürich.
- GIGON A. (1981): Oekologische Stabilität; Typologie und Realisierung. Bundesamt für Umweltschutz, Bern.
- GROSJEAN G. und Mitarbeiter (1986): Aesthetische Bewertung ländlicher Räume am Beispiel von Grindelwald. Geographica Bernensia, 13P, Bern.
- GÜNZLER-SEIFFERT H. + WYSS R. (1938): Erläuterungen zum Geologischen Atlas der Schweiz, Blatt 396 Grindelwald. Geolog. Komm. der SNG. Zürich.
- GUTERSOHN H. (1973): Geographie der Schweiz. Bd. II: Die Alpen. Kümmerly + Frey, Bern.
- HAECKEL E. (1866): Allgemeine Entwicklungsgeschichte der Organismen. Georg Reimer-Verlag, Berlin.
- HARD G. (1973): Die Geographie. Eine wissenschaftstheoretische Einführung. Berlin, New York.
- HERSCHY R.W. (Hrsg.) (1978): Hydrometry; Principles and Practices. Wiley-Interscience Publication, Bristol.
- HOEGL O. (Hrsg.) (1980): Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Paul Haupt, Bern, Stuttgart.
- JOSS J. (1969) et al.: Untersuchungen zur qualitativen Bestimmung von Niederschlagsmessungen mittels Radar. Veröffentl. SMA Nr. 14, Zürich.
- KASSER P. (1959): Der Einfluss vom Gletscherrückgang und Gletschervorstoss auf den Wasserhaushalt. In: Wasser- und Energiewirtschaft 6.
- KELLER R. (1951): Natur und Wirtschaft im Wasserhaushalt der rheinischen Landschaften und Flussgebiete. Remagen.
- KELLER R. (1980): Hydrologie. Erträge der Forschung. Bd. 143, Darmstadt.
- KIENHOLZ H. (1977): Kombinierte geomorphologische Gefahrenkarte 1:10'000 von Grindelwald. Geographica Bernensia G4, Geographisches Inst. Univ. Bern.
- KUNZ S. (1982): Anwendungsorientierte Kartierung der Besonnung im regionalen Massstab. Geogr. Inst. Univ. Bern.
- LANDESHYDROLOGIE (1982): Handbuch für die Abflussmessung. Mitteil. Nr. 4, Bern.

- LANG H. (1978): Zum Problem der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Verdunstung in der Schweiz. In: Die Verdunstung in der Schweiz. Beitr. z. Geol. der Schweiz - Hydrologie, Nr. 25, Kümmerly + Frey, Bern.
- LANG H. + SCHAEGLER B. (1980): Wasserhaushalt und Wärmehaushalt. In: Wasser, Energie, Luft. H9, 72, 284-289.
- LEIBUNDGUT CH. (1977): Konzept zur Methodik der Hydroökologie. Kolloquiumsvortrag. Geographisches Inst. Univ. Bern.
- LEIBUNDGUT CH. (1978a): Die Berechnung der Verdunstung aus der Wasserbilanz von Einzugsgebieten. In: Beitr. z. Geol. d. Schweiz Hydrologie, Nr. 25, Kümmerly + Frey, Bern.
- LEIBUNDGUT CH. (1978b): Forschungsgesuch MAB-6-Grindelwald-Teilprojekt Wasser - Schweiz. Nat.-Fonds; Nationale Programme, Bern.
- LEIBUNDGUT CH. et al. (1981): Tracerhydrologische Untersuchungen im Langetental (Schweiz): In: Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, Bd. 33, 5-123, Graz.
- LEIBUNDGUT CH. (1982): Zur Hydrogeoökologie des Raumes Grindelwald. In: Tagungsbericht 18. Dt. Schulgeographentag, Basel, 179-186.
- LEIBUNDGUT CH. (1984a): Hydrologisches Potential - Veränderungen und Gefährdung. In: Umbruch im schweiz. Berggebiet, 265-297. Bern.
- LEIBUNDGUT CH. (1984b): Einsatzmöglichkeiten eines neuen Abflussmessgerätes nach der Verdünnungsmethode. Vortragsmanuskript: Tagung Arbeitskreis Hydrologie. Seeshaupt OBB.
- LEIBUNDGUT CH. (1984c): Zur Erfassung hydrologischer Messwerte und deren Uebertragung auf Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen. In: Geomethodica, 9. BGC, Basel.
- LEIBUNDGUT CH. (1985): Niederschlagsuntersuchungen in kleinen hydrologischen Einzugsgebieten. In: Der Niederschlag in der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, Nr. 31, Bern.
- LEIBUNDGUT CH. (1986): Zur Methodik der Uferschutz-Bewertung. In: Der Mensch in der Landschaft, Festschrift G. Grosjean, 151-171, Bern.
- LESER H. (1976): Landschaftsökologie. UTB 521, Stuttgart.
- LUDER B. (1986): Ein Messgerät zur Bestimmung des Abflusses nach dem Verdünnungsverfahren. Hausarbeit Geographisches Inst. Univ. Bern.

- MESSERLI P. + MESSERLI B. (1978): Wirtschaftliche Entwicklung und ökologische Belastbarkeit im Berggebiet (MAB-Schweiz). In: Geographica Helvetica, 33, 203-210.
- MESSERLI P., SCHEURER T., WIESMANN U. (1986): Modellstudie Grindelwald zur Umweltverträglichkeit olymischer Winterspiele im Berner Oberland 1996/2000. Bericht Geogr. Inst. Univ. Bern.
- MUELLER I. et al. (1980): Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura. Steir. Beiträge zur Hydrogeologie, Bd. 32, Graz.
- NAEGELI R. (1982): Strukturverhältnisse und Entwicklung der Berglandwirtschaft im Touristikgebiet. Geographisches Inst. d. Univ. Bern.
- NAEGELI R. (1986): Die Berglandwirtschaft und Alpwirtschaft in Grindelwald. Schlussbericht Schweiz. MAB-Programm Nr. 21, Bern.
- NEEF E. (1961): Zur grossmassstäblichen landschaftsökologischen Forschung. Petermanns Geographische Mitteilungen 1/2.
- OESCHGER H. + SIEGENTHALER U. (1972): Umgebungsisotope im Dienste der Hydrologie und Ausblick auf neue Methoden. GWF-Wasser/Abwasser 113, 501-508, München.
- PENMANN H.L.(1956): Evaporation: an introductory survey. In: Netherlands agric. science 4, 9-29, Wageningen.
- PEREIRA L. + KELLER H. (1982): Recession Characterization of small Mountain Basins, Derivation of Master Recession curves and Optimization of Recession Parameters. In: IAHS Publ. Nr. 138, 243-255, Paris.
- PERRET P. (1977): Zustand der schweiz. Fließgewässer in den Jahren 1974/75 (Projekt MAPOS): Eidg. Amt f. Umweltschutz, Eidg. Anstalt f. Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Bern und Dübendorf.
- PFISTER H. (1984): Grünlandgesellschaften, Pflanzenstandort und futterbauliche Nutzungsvarianten im montan-subalpinen Bereich (Testgebiet Grindelwald); Schlussbericht Schweiz. MAB-Programm Nr. 7, Bern.
- DE QUERVAIN M. + ZINGG T. (1951): Ueber die Verdunstung der alpinen Schneedecke. IAHS General Assembly of Bruxelles, Vol. I, 154-160, Bruxelles.
- RICHTER W. + LILLICH W. (1975): Abriss der Hydrogeologie. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- RODDA J.C. et al. (1976): Systematic Hydrology. London 1976.
- RYSER AG (1966): Sondierbohrung Nr. 1 für die Wasserversorgung der Gemeinde Grindelwald. Plan 64/250-1, Ingenieurbüro Ryser AG Bern.

- SCHAEDLER B. (1980): Die Variabilität der Evapotranspiration im Einzugsgebiet Rietholzback bestimmt mit Energiebilanzmethoden. Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETHZ Nr. 46, Zürich.
- SCHAEDLER B. (1985): Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitt. der Landeshydrologie Nr. 6, Bern.
- SCHEURER T. (1981): Durchlässigkeit und Mächtigkeit der Böden in Grindelwald (Arbeitskarte 1:25'000). Geographisches Inst. d. Univ. Bern.
- SCHEURER T. (1985): Bodenbildung und Bodenveränderung im Berggebiet (Testgebiet Grindelwald); Schlussbericht Schweiz. MAB-Programm Nr. 12, Bern.
- SCHOTTERER U., FELBER H.U., LEIBUNDGUT CH. (1982): Tritium and Oxygen-18 as natural tracers in the complex hydrology of the alpine basin of Grindelwald (Switzerland). In: Beiträge z. Geol. d. Schweiz - Hydrologie Nr. 28 II, 438-444. Schweiz. Geotechn. Komm. u. Hydrol. Komm. SNG. Kümmerly + Frey, Bern.
- SEVRUK B. (1981): Correction of the systematic error in precipitation measurement by Hellmann Gauges in the Swiss national network. Reprint, 2nd WMO technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II) Mexico-City, Mexico, 12-16/10/81.
- SEVRUK B. (1986): Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. In: Niederschlag in der Schweiz. Beitr. zur Geol. der Schweiz - Hydrologie, Nr. 32, Kümmerly + Frey, Bern.
- SIEGENTHALER U. et al. (1983): Sauerstoff-18 und Tritium als natürliche Tracer im Grundwasser. In: Gas - Wasser - Abwasser, Nr. 9, 63, 477-483.
- SPREAFICO M. (1986): Abschätzung der Abflüsse in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung. In: Beitr. z. Geol. der Schweiz - Hydrologie, Nr. 33, Kümmerly + Frey, Bern.
- SPAETH H.-J. (1976): Geoökologisches Praktikum. UTB. Paderborn.
- STREIT U. + PAUS L. (1985): Konstruktion kleinräumig differenzierter, ereignisbezogener Abfluss-Choroplethenkarten nach dem Prinzip der räumlichen Disaggregation - Zielsetzung, Modellkonzept und erste Resultate. Inst. für Geographie der Universität Münster.
- SUSEDKA U. (1982): Das thermische Verhalten der Gewässer im Raume Grindelwald. Hausarbeit Geographisches Inst. Univ. Bern.
- TROEHLER B. (1966): Geologie der Glockhaus-Gruppe. Beitrag z. Geol. d. Schweiz, Geotechn. Serie, XIII. Lfg., Bd. 10, Kümmerly + Frey, Bern.

- VISCHER D. + SEVRUK B. (1975): Die Fehler der Niederschlagsmessung. In: Mitteilungen Eidg. Anst. für forstl. Versuchswesen, Bd. 51, 151-170.
- WAEELTI R. (1981): Markierversuch Anggistalden, Grindelwald. Hausarbeit Geographisches Inst. Univ. Bern.
- WEINGARNTER R. (1980): Hydrogeographischer Beitrag zur Methodik der Schutzzonenbemessung bei Quellen. Diplomarbeit Geographisches Inst. Univ. Bern.
- WEINGARTNER R. (1986): Konzept eines "hydrologischen Atlas der Schweiz". Publikation Gewässerkunde Nr. 67, Bern.
- WERNLI H. R. (1981): Wasserbeschaffenheit und Raumfaktoren. Diplomarbeit Geographisches Inst. Univ. Bern.
- WIESMANN U. (1986): Die wirtschaftliche, gesellschaftliche und räumliche Bedeutung des Fremdenverkehrs in Grindelwald. Schlussbericht MAB (in Vorbereitung), Bern.
- WIESMANN U., SCHEURER T., APEL H. (1987): Wandel im Gletscherdorf. Projektsynthese MAB-Grindelwald (in Vorbereitung), Bern.
- ZELLER et al. (1984): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. Bd. 5. EAFV, Birmensdorf.

PUBLIKATIONSREIHE: FACHBEITRAEGE ZUR SCHWEIZ. MAB-INFORMATION

Bisher erschienene Fachbeiträge:

- Nr. 1 MESSERLI, B., MESSERLI, P.: Wirtschaftliche Entwicklung und ökologische Belastbarkeit im Berggebiet, 1979 (vergriffen).
- Nr. 2 MESSERLI, P., MATTIG, F.: Touristische Entwicklung im inneralpinen Raum, Konsequenzen, Probleme, Alternativen, 1979 (vergriffen).
- Nr. 3 MATTIG, F., MESSERLI, P., ZEITER, H.P.: Zwischenbilanz nach einem Jahr MAB-Forschung im Testgebiet Aletsch (Hypothesenkatalog), 1980 (vergriffen).
- Nr. 4 BRIDEL, L., COSINSCHI, E., COSINSCHI-MEUNIER, M.: Division régionale des Alpes Suisses et représentative des aires-tests du programme MAB-6, 1980 (vergriffen).
- Nr. 5 DARBELLAY, CH.: Typologie des communes de montagne, 1980 (vergriffen).
- Nr. 6 LIEBERHERR, F.: La dimension socio-culturelle cachée, 1980 (vergriffen).
- Nr. 7 GIGON, A.: Oekologische Stabilität, Typologie und Realisierung, 1981 (vergriffen).
- Nr. 8 LIEBERHERR, B.: Système écologique et conflits d'affectations dans les régions de montagne; recherche méthodologique, 1981 (auch in Deutsch erhältlich).
- Nr. 9 AEGERTER, S., MESSERLI, P.: The impact of hydroelectric power plants on a mountainous environment: A technique for assessing environmental impacts, 1981.
- Nr. 10 LESER, H., MEISTERHANS, E., MOSIMANN, T., VON WYL, A.: Oekologische Auswirkungen von Skipisten (Ertragsverminderung, Vegetationszerstörung, Erosionsgefährdung), 1982 (vergriffen).
- Nr. 11 BEGUIN, C., THEURILLAT, J.P.: Analyse de la végétation et du paysage de la région d'Aletsch, 1982.
- Nr. 12 LUDER, R.: Zur ökologischen Bewertung von Landschaftsteilen auf der Grundlage von ornithologischen Daten, 1982.
- Nr. 13 APEL, H.: Dynamische Simulation eines Bergökosystems (Testgebiet Grindelwald). Theoretischer Ansatz und Modellentwurf, 1982.

PUBLIKATIONSREIHE: FACHBEITRÄGE ZUR SCHWEIZ, MAB-INFORMATION

- Nr. 14 MESSERLI, B., MESSERLI, P., DARBELLAY, CH., STUCKI, E., CHAPALAY, A.: Contribution Suisse à la conférence sur l'exposition internationale "L'écologie en action" à Paris, 22-29 septembre 1981; 1983.
- Nr. 15 LANGENEGGER, H., VON GRUENIGEN, CHR.: Tiefschneeski-fahren und Waldverjüngung im Bereich der oberen Waldgrenze. Ergebnisse einer Untersuchung im Testgebiet Grindelwald, 1983.
- Nr. 16 KUECHLI, CHR., GUGGENBUEHL, R., MESSERLI, P.: Oeffentlichkeitsarbeit im MAB-Programm. Ergebnisse eines Seminars mit Medienvertretern vom 26.1./16.2.1983, 1983.
- Nr. 17 WANNER, H.: Aspekte sozialen Wandels in peripheren Agrarräumen eines Industrielandes (Kurzbericht einer sozial-geographischen Untersuchung im schweizerischen Berggebiet), 1983.
- Nr. 18 ELSASSER, H., MESSERLI, P. (HRSG.): Oekologie und Oekonomie im Berggebiet. Referate anlässlich der Jahresversammlung der Schweiz. Gesellschaft für angewandte Geographie vom 25./26. Juni 1983, 1983.
- Nr. 19 MESSERLI, P., STUCKI, E. (HRGS.): Colloque international MAB-6 Les Alpes. Modèle et synthèse. Pays-d'Enhaut, 1-3 juin 1983, 1983.
- Nr. 20 RENEVEY, B.: Evaluation ornitho-écologique du paysage de la région d'Aletsch / Ornitho-ökologische Bewertung der Landschaft im Testgebiet Aletsch, 1984.
- Nr. 21 STEINER, D., ZAMANI, F.: Datenbank MAB-Grindelwald, 1984.
- Nr. 22 VOLZ, R., BAUMGARTNER, M.: Vergleichende Darstellung und Interpretation der lufthygienischen Messungen in den MAB-Testgebieten Davos und Grindelwald, 1985.
- Nr. 23 NAEGELI, R.: Landwirtschaftliche Betriebsfallstudien im MAB - Testgebiet Grindelwald, 1986.
- Nr. 24 VOLZ, R.: Oekologische Auswirkungen des Skitourismus. Eine Zusammenfassung der im Rahmen des MAB - Programmes durchgeführten Untersuchungen, 1986.

PUBLIKATIONSREIHE: FACHBEITRAEGE ZUR SCHWEIZ. MAB-INFORMATION

- Nr. 25 MEESEN, H., LUDER, P.: Landschaftskonzept Aletsch. Umsetzung von Ergebnissen der MAB-Forschung Aletsch zu einem flächendeckenden und nutzungsbezogenen Landschaftskonzept, 1987.
- Nr. 26 GUENTER, T.: Natur- und Landschaftsschutz als Element der qualitativen Fremdenverkehrsentwicklung, 1987.

PUBLIKATIONEN AUSSERHALB DER REIHEN "FACHBEITRÄGE" UND
"SCHLUSSBERICHTE"

- KRIPPENDORF, J., MESSERLI, P., HAENNI, H., 1982: Tourismus und regionale Entwicklung. Themaband NFP "Regionalprobleme" und "MAB". Verlag Rüegger, Diessenhofen; 387 Seiten, Fr. 38.--.
- KNEUBUEHL, U. 1987: Die Entwicklungssteuerung in einem Tourismusort. Untersuchung am Beispiel Davos für den Zeitraum 1930-1980. Geographica Bernensia, P 12, Geogr. Institut, Bern. 421 Seiten, Fr. 25.--.
- REINHARDT, E., 1982: Entwicklung von Ferienorten. Die Beteiligung von Ortsansässigen. Schweiz. Vereinigung für Landesplanung, Schriftenfolge Nr. 34; 137 Seiten. Bezug: Schweizerische Vereinigung für Landesplanung, Schänzlihalde 21, 3013 Bern.
- BRUGGER, E.A., FURRER, G., MESSERLI, B., MESSERLI, P. (Herausgeber/Editeurs), 1984: Umbruch im Berggebiet / Les régions de montagne en mutation. Verlag Paul Haupt, Bern; 1'100 Seiten/pages. Fr. 120.--.
- BRUGGER, E.A., FURRER, G., MESSERLI, B., MESSERLI, P. (Editors), 1984: The transformation of Swiss Mountain Regions. Paul Haupt Publishers Berne; 700 pages. SFr. 69.--.
- MATTIG, F., ZEITER, H.-P., 1984: Der touristische Wachstumsprozess im MAB-Testgebiet Aletsch, seine räumliche Ausprägung und seine Auswirkungen auf Bevölkerung, Arbeitsmarkt und Gemeindefinanzen. Verlag Druck AG, Fiesch/VS; 397 Seiten, Fr. 50.--. Bezug: Zeiter H.-P., Klosiweg 28, 3904 Naters/VS.
- BUNDESAMT FUER LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.) 1985: Die Berglandwirtschaft im Spannungsfeld zwischen Oekonomie und Oekologie. Kolloquium MAB der Landwirtschaftlichen Forschungskommission, 23. November 1984. Wissenschaftliche Beilage zum Landwirtschaftlichen Jahrbuch des Schweiz. Bundesamtes für Landwirtschaft, Bern; 123 Seiten. Bezug: MAB-Sekretariat, Geogr.Inst. Uni Bern, Bern.
- KRIPPENDORF, J., 1986: Alpsegen - Alptraum. Für eine Tourismusentwicklung im Einklang mit Mensch und Natur / La-haut sur la montagne... Pour un développement du tourisme en harmonie avec l'homme et la nature. Kümmerly+Frey, Bern. 88 Seiten/pages, Fr. 12.--.

PUBLIKATIONSREIHE: SCHLUSSBERICHTE ZUM SCHWEIZ. MAB-PROGRAMM

Bisher erschienene Schlussberichte:

- Nr. 1 SCHWARZE, M., HENZ, H., REINHARDT, E., SCHLAEPFER, H.: Tourismus und Erholung in Beziehung zur Land- und Forstwirtschaft, 1983; 150 Seiten (vergriffen).
- Nr. 2 MEYRAT-SCHLEE, E.: Werte und Verhalten. Bedeutung und Wirkungsweise von Wertsystemen im Entwicklungsprozess einer Berggemeinde, aufgezeigt am Beispiel von Grindelwald; 1983; 178 Seiten.
- Nr. 3 AUCHLIN, P., VIETTI-VIOLI, PH.: Perception du Pays-d'Enhaut par ses touristes (1980-1981); 1983; 134 pages.
- Nr. 4 KYBURZ, R., SCHMID, B.: Ein Gesamtmodell für die Region Pays-d'Enhaut. Demonstrationsbeispiel; 1983; 71 Seiten.
- Nr. 5 APEL, H.: Dynamische Simulation eines Bergökosystems (Testgebiet Grindelwald); 1983; 104 Seiten.
- Nr. 6 FRACHEBOUD, J.-F.: Modèle de simulation d'un écosystème de montagne, aire-test Pays-d'Enhaut; 1984; 86 pages.
- Nr. 7 PFISTER, H.: Grünlandgesellschaften, Pflanzenstandort und futterbauliche Nutzungsvarianten im montan-subalpinen Bereich (Testgebiet Grindelwald); 1984; 155 Seiten.
- Nr. 8 LIEBERHERR-GARDIOL, F.: Des Hommes et des Natures. Le Pays-d'Enhaut en 1984; 1984; 2 tomes, tome 1: 161 pages, tome 2: 171 pages.
- Nr. 9 DIRECTION DU PROJET MAB PAYS-D'ENHAUT: Agriculture Pays-d'Enhaut. Synthèse partielle; 1985; 121 pages.
- Nr. 10 VON WYL, A., MERCIER, A., TROXLER, J.: L'exploitation ovine en altitude; 1985; 143 pages.
- Nr. 11 KUPFER, F., LANGENEGGER, H.: Der Wald in Grindelwald: Zustand, Produktion und Nutzungsmöglichkeiten; 1985; 100 Seiten.
- Nr. 12 SCHEURER, T.: Bodenbildung und Bodenveränderung im Berggebiet (Testgebiet Grindelwald); 1985; 191 Seiten-

PUBLIKATIONSREIHE: SCHLUSSBERICHTE ZUM SCHWEIZ. MAB-PROGRAMM

- Nr. 13 GUENTER, T.: Landnutzungsänderungen in einem alpinen Tourismusort. Ein integraler Ansatz zur Erfassung von Wechselbeziehungen zwischen raumwirksamen sozio-ökonomischen Prozessen und dem Naturhaushalt, dargestellt am Beispiel Davos; 1985; 170 Seiten.
- Nr. 14 DIRECTION DU PROJET MAB-PAYS-D'ENHAUT: Population et économie régionale. Synthèse partielle; 1985; 64 pages.
- Nr. 15 DIRECTION DU PROJET MAB-PAYS-D'ENHAUT: Tourisme Pays-d'Enhaut. Synthèse partielle; 1985; 106 pages.
- Nr. 16 MOSER, H.R.: Die lufthygienischen Verhältnisse im Hochtal von Davos; 1985; 55 Seiten.
- Nr. 17 BELLWALD, S., GRAF, H.: Der Wald im Aletschgebiet - Zustand und Entwicklungstendenzen; 1985; 147 Seiten.
- Nr. 18 KRAUSE, M.: Die Böden von Davos: Ertragspotential, Belastbarkeit und Gefährdung durch Nutzungsänderungen; 1986; 148 Seiten.
- Nr. 19 MUELLER, H.-R.: Tourismus in Berggemeinden: Nutzen und Schaden. Eine Synthese der MAB-Forschungsarbeiten aus tourismuspolitischer Sicht; 1986; 297 Seiten.
- Nr. 20 GROSJEAN, G. und Mitarbeiter: Aesthetische Bewertung ländlicher Räume am Beispiel von Grindelwald im Vergleich mit anderen schweizerischen Räumen und in zeitlicher Veränderung; 1986; 186 Seiten.
- Nr. 21 NAEGELI, R.: Die Berglandwirtschaft und Alpwirtschaft in Grindelwald; 1986; 273 Seiten.
- Nr. 22 COMBE, J., FREI, Ch.: Die Bewirtschaftung des Bergwaldes: Entscheidungsgrundlagen und Handlungskonzepte; 1986; 180 Seiten.
- Nr. 23 HEFTI, R., BUEHLER, U.: Zustand und Bedrohung der Davoser Waldungen; 1986; 125 Seiten.
- Nr. 24 WIESMANN, U.: Wirtschaftliche, gesellschaftliche und räumliche Bedeutung des Fremdenverkehrs in Grindelwald; 1986; 180 Seiten.
- Nr. 25 MESSERLI, P.: Modelle und Methoden zur Analyse der Mensch-Umweltbeziehungen im alpinen Lebens- und Erholungsraum. Erkenntnisse aus dem schweizerischen MAB-Programm 1979-85; 1986; 172 Seiten.

PUBLIKATIONSREIHE: SCHLUSSBERICHTE ZUM SCHWEIZ. MAB-PROGRAMM

- Nr. 26 DIRECTION DU PROJET MAB-PAYS-D'ENHAUT: Aménagement du territoire et protection de la nature au Pays-d'Enhaut. Synthèse partielle; 1986; 145 pages.
- Nr. 27 SPRING, J.-L., FRACHEBOUD, J.-F., DARBELLAY, CH., STUCKI, E.: Agriculture montagnarde et environnement naturel: Une symbiose à redécouvrir, à recréer et à perpétuer; 1986; 262 pages.
- Nr. 28 MESSERLI, P., SCHEURER, T., WIESMANN, U.: Modellstudie Grindelwald zur Umweltverträglichkeit olympischer Winterspiele im Berner Oberland 1996/2000; 1986; 120 Seiten.
- Nr. 29 MERCIER, A., ESCUDERO, A., WETTSTEIN, J.-B.: Quelques aspects de la production fourragère dans le Pays-d'Enhaut; 1987; 122 pages.