

Kriterien zur Klassifikation von Grundwasservorkommen

Autor(en): **Jäckli, Heinrich**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **63 (1970)**

Heft 2

PDF erstellt am: **17.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-163850>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Kriterien zur Klassifikation von Grundwasservorkommen

Von HEINRICH JÄCKLI

ZUSAMMENFASSUNG

Für eine typologische Klassifikation von Grundwasservorkommen werden vorerst in analytischer Weise die verschiedenen Kriterien einzeln berücksichtigt, nämlich

- die Grundwasserleiter und deren Art bezüglich der Zirkulation, nämlich Poren-, Kluft- oder Karstzirkulation, deren mineralogische Zusammensetzung, Durchlässigkeit und Form und Struktur als geologische Kriterien;
- die Neubildung des Grundwassers durch Niederschläge oder Infiltration aus Oberflächengewässern als meteorologische Kriterien;
- die Druckverhältnisse, die Druckschwankungen und die Beziehungen zur Vorflut als physikalische Kriterien;
- und schliesslich der Gehalt an gelösten Substanzen als chemische Kriterien.

Wenn sich nun verschiedene dieser Kriterien gegenseitig bedingen, so spricht man von «Korrelationen», seien sie «einfach», nämlich bloss zwei Parameter betreffend, oder seien sie «mehrfach», eine ganze Anzahl von Kriterien umfassend. Für solche wurde bisher häufig der Begriff «Grundwassertyp» verwendet, obschon dieser Begriff bisher sehr uneinheitlich angewendet wurde.

Die Probleme der hierarchischen Gliederung und seitlichen Abgrenzung von Typen und Untertypen wie auch der Nomenklatur sind in der Grundwassertypologie noch nicht gelöst. Neben Kurzbezeichnungen, die ihren Namen von einer Typuslokalität beziehen, oder «Vollbezeichnungen», die alle Kriterien in geordneter Reihenfolge ausführlich und einzeln nennen, werden auch Vor- und Nachteile einer Chiffrierung diskutiert und eine Chiffriermethode vorgeschlagen, die mittels Buchstaben und Zahlen 13 verschiedene Parameter zu erfassen vermag.

Schliesslich werden auch noch die verschiedenen anthropogenen Eingriffe in die Grundwasservorkommen angetönt als Veränderungen des Grundwassertypus durch den Menschen.

RÉSUMÉ

Pour arriver à une classification typologique des nappes d'eau souterraine, nous examinons d'abord séparément et d'une manière plus ou moins analytique les différents critères. Ceux-ci sont:

- les aquifères et leurs systèmes de circulation (pores, fissures, karst), leurs composition minéralogique, leur perméabilité et leurs formes et structures, tous ensemble des critères géologiques;
- l'alimentation d'eau souterraine par l'infiltration de précipitations ou d'eau de rivières, comme critères météorologiques;
- la pression, ses fluctuations et les relations avec le niveau de base, comme critères physiques;
- la teneur en matières solubles, comme critères chimiques.

S'ils n'existaient pas de corrélations, c'est-à-dire si les uns de ces critères ne seraient pas souvent liés à des autres, le grand nombre de paramètres permettrait de former une quantité énorme de variations. Ce sont surtout de telles corrélations multiples qui furent nommées «types d'eau souterraine» (Grundwassertypen), terme encore mal défini. Les problèmes de la délimitation ainsi que de la nomenclature des types de nappe ne sont pas encore résolus. Les termes courts, souvent formés selon des localités typiques, ainsi que les longues descriptions détaillées ont avantages et désavantages.

Adresse des Autors: Jacob Burckhardt-Strasse 8, 8049 Zürich.

Nous proposons donc une nouvelle méthode: un code de caractères et de chiffres nous permet de décrire 13 différents paramètres caractérisant la nappe.

Le dernier chapitre traite tout brièvement les différentes activités humaines qui influencent les types de nappe.

ABSTRACT

In order to obtain a typological classification of ground water occurrences each of the different criteria is first described in an analytical way. Those are

- the aquifers and their circulation systems (pores, fissures, karst), their mineralogical composition, their permeability and their structures, as geological elements;
- the recharge of ground water by precipitations or infiltration of river water, as meteorological elements;
- the ground water pressure, its fluctuations and the connection with the base level, as physical and hydraulic elements;
- the content of dissolved constituents, as chemical elements.

Many of these criteria are related to others. For such multiple correlations the term "ground water type" has often been used, although it is not clearly defined. The problems concerning the limits as well as the nomenclature of such ground water types are not yet solved. Short terms, often deduced from a type locality, or complete descriptions show their advantages and disadvantages. In this paper a new code method is proposed: 13 different parameters represented by letters and ciphers in a strictly fixed succession, characterise the nature of a ground water occurrence.

In the final chapter, the influence of man on natural ground water types is briefly mentioned.

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	392
I. Geologische Kriterien: Die Grundwasserleiter	392
A. Art der Zirkulation	393
1. Zirkulation in Poren	393
a) Lockergesteine	393
b) Festgesteine	393
2. Zirkulation auf Klüften	393
3. Karstzirkulation	394
4. Übergangsglieder und Kombinationen	394
B. Mineralogische Zusammensetzung der Grundwasserleiter	395
C. Durchlässigkeit	395
1. Bei Porenzirkulation	395
2. Bei Kluft- und Karstzirkulation	396
D. Form des Grundwasserleiters	397
1. Morphologische Strukturen	397
2. Stratigraphische Strukturen	398
3. Tektonische Strukturen	398
4. Lineamentstrukturen	398
II. Meteorologische Kriterien: Die Neubildung des Grundwassers	399
A. Durch Versickerung der Niederschläge	399
B. Durch Infiltration aus Oberflächengewässern	401
C. Grundwasserübertritte, unterirdische Zuflüsse	402
D. «Echtes» Grundwasser	402
E. «Fossile» Vorkommen	403

III. Physikalische Kriterien	404
A. Druckverhältnisse	404
1. Sickerwasser	404
2. Schichtwasser	404
3. Grundwasser s. str.	404
4. Stockwerkbau	406
B. Druckschwankungen	408
1. Periodische Schwankungen	408
2. Aperiodische Schwankungen	408
3. Trend	408
4. Überlagerungen	409
C. Beziehungen zur Vorflut	409
1. Indirekte Verbindung	409
2. Direkte Verbindung	411
3. Bedeckte Verbindung	411
IV. Chemische Kriterien	412
A. Gesamtkonzentration	412
B. Anteil der einzelnen Komponenten	413
C. Sauerstoffgehalt	413
D. Beeinflussung des Chemismus durch Flussinfiltration	414
1. Infolge Mischung	414
1. Infolge chemischer Reaktion	414
E. Benennung	415
1. Nach Millivalprozenten	415
2. Nach F. NÖRING	415
3. Nach H. LANGGUTH	415
V. Korrelationen	417
A. Einfache Korrelationen	417
B. Mehrfache Korrelationen	418
C. Gestörte Korrelationen. Mischtypen	419
D. Beispiele	419
1. Vorschlag L. GERB	419
2. Vorschlag H. FAST und K. SAUER	420
E. Abgrenzungs- und Nomenklaturfragen	421
1. Kurzbezeichnungen	421
2. Vollbezeichnungen	422
3. Chiffrierung	423
4. Vorschlag für eine Chiffriermethode	424
VI. Anthropogene Eingriffe	427
A. Eingriffe in den Grundwasserleiter	427
1. Verringerung der Durchlässigkeit	427
2. Verringerung des Volumens	427
B. Beeinflussung der Neubildung	427
1. Verringerung der Grundwasser-Neubildung	427
2. Verstärkung der Grundwasser-Neubildung	428
C. Hydrologische Eingriffe	428
1. Veränderung des piezometrischen Niveaus	428
2. Veränderung der Druckschwankungen	429
D. Beeinflussung des Chemismus	429
1. Künstliche Veränderung des Sauerstoffgehaltes	429
2. Künstliche Erhöhung der Mineralisation	430
3. Künstliche «Verbesserung» des Chemismus	430
4. Künstliche Durchmischung	430
VII. Schlussfolgerungen	431
Literaturverzeichnis	431

Einleitung

Grundwasser ist ein integrierender Bestandteil des Untergrundes, mit dem sich die Geologen beschäftigen, und nimmt am Wasserkreislauf teil, der üblicherweise von den Hydrologen untersucht wird. Zudem gehört das Grundwasser im weiteren Sinn zu den nutzbaren Bodenschätzen, weist aber zwei Eigentümlichkeiten auf, die festen Bodenschätzen fremd sind:

- Es bewegt sich, ähnlich dem Erdöl,
- und es unterliegt einer raschen und fast permanenten Neubildung, und zwar auch dort, wo es genutzt wird. Darin nimmt es eine Sonderstellung gegenüber anderen Bodenschätzen ein, deren Neubildung geologische Zeiträume beansprucht und in der Regel nicht im Nutzungsgebiet (nicht in einem produktiven Ölfeld oder in einem Bergwerk oder einem Steinbruch) erfolgt.

Die Grundwasserkunde, auch wenn sie als geologische Wissenschaft aufgefasst wird, kommt wegen dieser Sonderstellung des Grundwassers nicht aus ohne Querverbindungen zur Meteorologie, zur Hydraulik und Hydrologie und zur Chemie. Ihre spezielle Position im Grenzbereich mehrerer naturwissenschaftlicher Disziplinen ist sicher mit ein Grund dafür, dass sich eine allgemein anerkannte und gebräuchliche Klassifikation mit einheitlicher Nomenklatur der Grundwassertypen bis heute noch nicht durchgesetzt hat. Kennzeichnend für die Jugendlichkeit der Hydrogeologie als Wissenschaft ist auch die Erscheinung, dass ihr wissenschaftliches und technisches Vokabular in allen Sprachen noch auffallend unpräzise, vieldeutig und voller Synonyme erscheint.

Für eine Klassifikation der Grundwasservorkommen sollen im folgenden vier Hauptkriterien berücksichtigt werden, nämlich

- der Grundwasserleiter, seine Lithologie, seine Form und Struktur als geologische Kriterien,
- die Neubildung des Grundwassers als meteorologische Kriterien,
- die hydrologischen Kennzeichen als physikalische Kriterien
- und schliesslich der Gehalt des Grundwassers an gelösten Substanzen als chemische Kriterien.

I. GEOLOGISCHE KRITERIEN: DIE GRUNDWASSERLEITER

Als Grundwasserleiter (franz. aquifère, engl. aquifer) bezeichnen wir einen geologischen Körper, der dank seiner Durchlässigkeit Grundwasser in nutzbaren Mengen speichern oder durch sich hindurch zirkulieren lassen kann.

Den Gegensatz stellt der Grundwasserstauer oder Nichtleiter dar, der dank seiner Undurchlässigkeit eine Zirkulation nutzbarer Grundwassermengen verunmöglicht.

Dass die gegenseitige Abgrenzung der beiden Typen oft unscharf ist, liegt in der Relativität des Begriffes Durchlässigkeit, gibt es doch Fälle mittlerer bis geringer Durchlässigkeit, wie etwa Wallmoränen, die gegenüber einem viel durchlässigeren Schotter als Grundwasserstauer, aber gegenüber einem noch viel undurchlässigeren Molassemergel gleichzeitig als Leiter wirken.

A. Art der Zirkulation

Eine erste Einteilung der Grundwasserleiter kann nach der Art der Zirkulation erfolgen, wobei drei Zirkulationsarten unterschieden werden, nämlich

- Zirkulation in Poren,
- Zirkulation in Klüften,
- Zirkulation in Karsthohlräumen.

1. Zirkulation in Poren

Die Porenzirkulation ist dreidimensional diffus; sie findet im ganzen wasser-gesättigten Teil des Porengrundwasserleiters statt; gewisse Zirkulationsrichtungen können als Folge der Schichtung allerdings bevorzugt sein.

a) Lockergesteine

In Lockergesteinen kommt praktisch überhaupt nur Porenzirkulation vor. Wichtigste Grundwasserleiter dieser Art sind etwa fluviatile Kiese und Grobsande, marine Strandsande, äolische Dünen-sande und kolluviale Schuttdecken, schliesslich auch lockere, noch unverfestigte und unverwitterte vulkanische Aschen.

Für Gebirgsländer charakteristisch sind Grundwasserleiter glazialer Fazies, nämlich Moränen (mindestens in ihrer kiesreichen, tonarmen Fazies der Ober- oder Randmoränen, während tonreiche Grundmoränen eher als Grundwasserstauer wirken), ferner Bergsturz-, Sackungs- oder Rutschungsschutt.

b) Festgesteine

Als Festgesteine mit Porenzirkulation kommen alle Sedimente in Frage, deren Poren unter sich noch kommunizieren, nämlich als klastische Sedimente Sandsteine, Konglomerate, Breccien, als chemisch-biogene Sedimente poröse Kalke und Kreiden, als Sonderfall Rauhwacken und Travertine.

Als poröse vulkanische Gesteine wirken gasreiche Laven und verfestigte vulkanische Aschen.

2. Zirkulation auf Klüften

Die Zirkulation auf Klüften ist im wesentlichen eine zweidimensional flächen-hafte, unabhängig ob die Absonderungsflächen dabei steil oder flach liegen. Gewisse Richtungen, durch Kluftsysteme bedingt, werden bevorzugt. Zwischen zwei wasser-führenden Klüften ist das Gestein «trocken» und wirkt im kleinen Bereich des Hand-stückes als undurchlässig.

Kluftzirkulation fehlt im Lockergestein; sie ist beschränkt auf Festgestein. Absonderungsflächen im weitesten Sinn, also Schichtfugen, Kluftflächen, Brüche und Verwerfungen wirken als Wasserwege. Man findet sie besonders ausgeprägt in allen spröden Gesteinen, wie etwa in Kalken, Dolomiten, spröden Sandsteinen und Konglomeraten, ebenso im Kristallin, also in Graniten, Dioriten, Basalten und ihren metamorphen Derivaten.

3. Karstzirkulation

Bei der Zirkulation im Karst liegt die Betonung auf Linien, «Adern», Gängen und langgestreckten Höhlensystemen. Im Gegensatz zur dreidimensionalen Poren- und der zweidimensionalen Kluftzirkulation betont sie als charakteristisches Element die eindimensionale Linie. Diese Linie ist aber keine Gerade, sondern vielfach gewunden und verbogen, und ihre Richtung lässt fast stets die Abhängigkeit von tektonischen und lithologischen Strukturen erkennen.

Diese Zirkulationswege wurden durch chemische Lösung geschaffen oder doch wesentlich vergrößert und können zu Gängen, Höhlen, Kavernen und grossen begehbaren oder sogar befahrbaren Hohlraumssystemen ausgeweitet sein. Die Karstzirkulation ist deshalb beschränkt auf chemisch relativ leicht lösliche Karbonat- und Salinargesteine, also Kalk, Dolomit, Gips, Anhydrit, Steinsalz und ihre Mischglieder.

Eine Karstzirkulation ganz besonderer Art findet im Gletschereis statt, wo Regenwasser gemeinsam mit Schmelzwasser in relativ kurzlebigen Hohlräumen von Karstcharakter mit grosser Geschwindigkeit fliesst und dabei diese Hohlräume fortlaufend verändert.

4. Übergangsglieder und Kombinationen

Zwischen den oben aufgeführten reinen Zirkulationsarten gibt es alle Übergangsglieder und Kombinationen, wie sie auf Figur 1 dargestellt sind.

Eine Kombination von Poren- und Kluftzirkulation weisen poröse geklüftete Sandsteine auf.

Von Poren- und Karstzirkulation existieren ebenfalls Kombinationen, wenn sie auch nicht sehr häufig sind. Dazu gehören etwa die alpinen Rauhwacken oder poröse Kreidekalke und Travertine, in denen sowohl eine nennenswerte Porenzirkulation möglich ist, wo aber gleichzeitig als Folge der chemischen Lösung auch eine Karstzirkulation vorkommen kann.

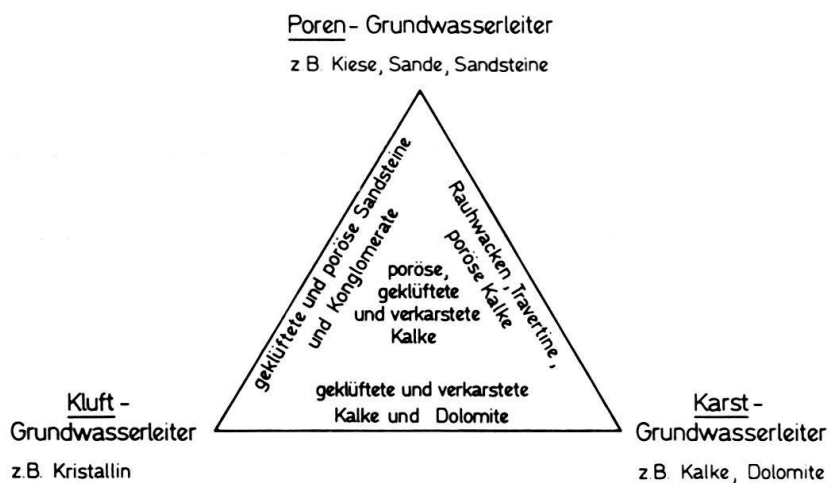


Fig. 1. Einteilung der Grundwasserleiter nach der Art der Zirkulation. Reine Arten, Übergangsglieder und Kombinationen.

Die Kombination von Kluft- und Karstzirkulation kann für geklüftete und verkarstete Kalke und Dolomite fast als die Regel, die reine Karstzirkulation eher als die Ausnahme gelten.

Schliesslich ermöglichen poröse, geklüftete und verkarstete Kalke gleichzeitig alle drei Arten von Zirkulation. Sie müssten auf dem Dreieck von Figur 1 dessen Mitte einnehmen.

B. Mineralogische Zusammensetzung der Grundwasserleiter

Der zweite Gesichtspunkt einer Einteilung der Grundwasserleiter berücksichtigt deren mineralogische Zusammensetzung, ist diese doch für den Chemismus des Grundwassers von ausschlaggebender Bedeutung.

Der Granit, der reine Kalkstein, das Gipsgestein oder der Salzstock sind extreme Glieder, die sich selbstverständlich im Chemismus ihres Grundwassers wieder auf ganz charakteristische Weise zu erkennen geben.

Die übliche chemische Klassifikation der Gesteine sei hier nicht wiederholt.

C. Durchlässigkeit

Eine dritte Einteilungsmethode der Grundwasserleiter benützt deren Durchlässigkeit.

Bei Porengrundwasserleitern ist die Durchlässigkeit eine Funktion von Korngrösse, Kornverteilung, Sortierung, Kornform, diagenetischer Zementation usw., also unabhängig von der Lithologie.

Bei Kluftgrundwasserleitern ist die Wegsamkeit eine Funktion der Kluftweite, Klufterhäufigkeit und Kluftlänge und der Sauberkeit der Klüfte, somit abhängig von der tektonischen Geschichte des betreffenden geologischen Körpers.

Bei Karstgrundwasserleitern schliesslich ist sie eine Funktion des Verkarstungsgrades und damit der Umstände und der Zeitspanne, während welcher er als löslicher, auslaugbarer Gesteinskörper über dem Meeresspiegel oder einer örtlichen Vorflut lag und der Verkarstung, d.h. der chemischen Auslaugung preisgegeben war.

1. Bei Porenzirkulation

Der Begriff der Durchlässigkeit lässt sich zahlenmässig eindeutig nur bei Porenzirkulation definieren, wobei üblicherweise der Durchlässigkeitskoeffizient k nach Darcy verwendet wird.

$$k = v/i \quad (v = \text{Filtergeschwindigkeit, } i = \text{Druckgefälle}).$$

Dieser mathematisch exakt definierte Wert k lässt sich in der Natur mittels Pumpversuchen, Absenk- oder Anstiegsversuchen in Brunnen und Bohrungen oder in

Markierungsversuchen, oder im Laboratorium an Bodenproben im Ödometer bestimmen.

Übernimmt man den k -Wert nach Darcy als Klassifikationskriterium, so erscheint die Einteilung in die folgenden 5 Gruppen gemäss Tabelle 1 als zweckmässig.

Tab. 1. Durchlässigkeiten bei Porenzirkulation

Durchlässigkeit	k-Wert nach Darcy		
	m/sec	cm/sec	m/Tag
sehr gross (z. B. grober, sandarmer Kies)	$> 10^{-2}$	> 1	> 864
gross (sandiger Kies)	$10^{-2}-10^{-3}$	$1-10^{-1}$	$864-86,4$
mittel (Grobsand)	$10^{-3}-10^{-4}$	$10^{-1}-10^{-2}$	$86,4-8,64$
klein (Feinsand, siltreicher Kies)	$10^{-4}-10^{-5}$	$10^{-2}-10^{-3}$	$8,64-0,86$
sehr klein (siltreicher Feinsand, lehmreicher Kies)	$< 10^{-5}$	$< 10^{-3}$	$< 0,86$

Stillschweigend wird dabei ein isotropes Medium angenommen, was in der Natur natürlich nie der Fall ist. Tatsächlich ist der k -Wert beispielsweise bei horizontal geschichteten Körpern in horizontaler Richtung stets grösser als in vertikaler. Die im Feld gemessenen k -Werte entsprechen üblicherweise ungefähr der grössten Durchlässigkeit, somit jener in horizontaler, nicht in vertikaler Richtung.

2. Bei Kluft- und Karstzirkulation

Bei Kluft- und Karstzirkulation versagt der Begriff der Durchlässigkeit nach Darcy in seiner exakten mathematischen Definition. Dort spricht man gelegentlich von «Wegsamkeit», welcher Begriff sich allerdings schlecht in Zahlen ausdrücken lässt.

In der Bohr- und Injektionstechnik wird ein empirisch zu bestimmender Durchlässigkeitswert verwendet, der angibt, wie gross die Wasserverluste aus Bohrlöchern ins Gestein sind. Diese Verluste werden umgerechnet auf Liter pro Minute pro Laufmeter Bohrloch bei 10 atü Druck, welche Einheit als 1 Lugeon definiert ist. 1 Lugeon entspricht einem k -Wert nach Darcy von etwa $1-5 \cdot 10^{-5}$ cm/sec.

Die grosse Schwierigkeit der experimentellen zahlenmässigen Erfassung der Wegsamkeit in Kluft- und Karstwasserleitern ist mit ein Grund, weshalb sich bei ihnen, im Gegensatz zu den Porenwasserleitern, eine Klassifikation nach der Wegsamkeit bisher kaum einzubürgern vermochte.

In vertikalen Grundwasserfassungen wird gelegentlich zum empirischen Vergleich der Durchlässigkeit die spezifische Ergiebigkeit des Brunnens E bei 1 m Absenkung verwendet. Dabei sollten die miteinander verglichenen Brunnen ähnliche Tiefe, ähnlichen Durchmesser und ähnlichen Filtereinbau aufweisen.

Da im porösen Medium die Brunnenergiebigkeit eines vollkommenen Brunnens mit dem k -Wert nach der bekannten Formel von DUPUIT

$$Q = \pi k (H^2 - h^2) / \ln(R/r)$$

in Beziehung steht, kann über dieselbe Formel auch mittels Brunnen in nichtporösen Grundwasserleitern deren Durchlässigkeit zahlenmässig erfasst werden.

Oft genügt dazu die häufig verwendete Näherungsformel

$$k = Q / \Delta H \cdot H$$

Q = Brunnenergiebigkeit,

ΔH = Absenkung des Wasserspiegels im Brunnen bei Pumpbetrieb,

H = Nutzbare Grundwassermächtigkeit.

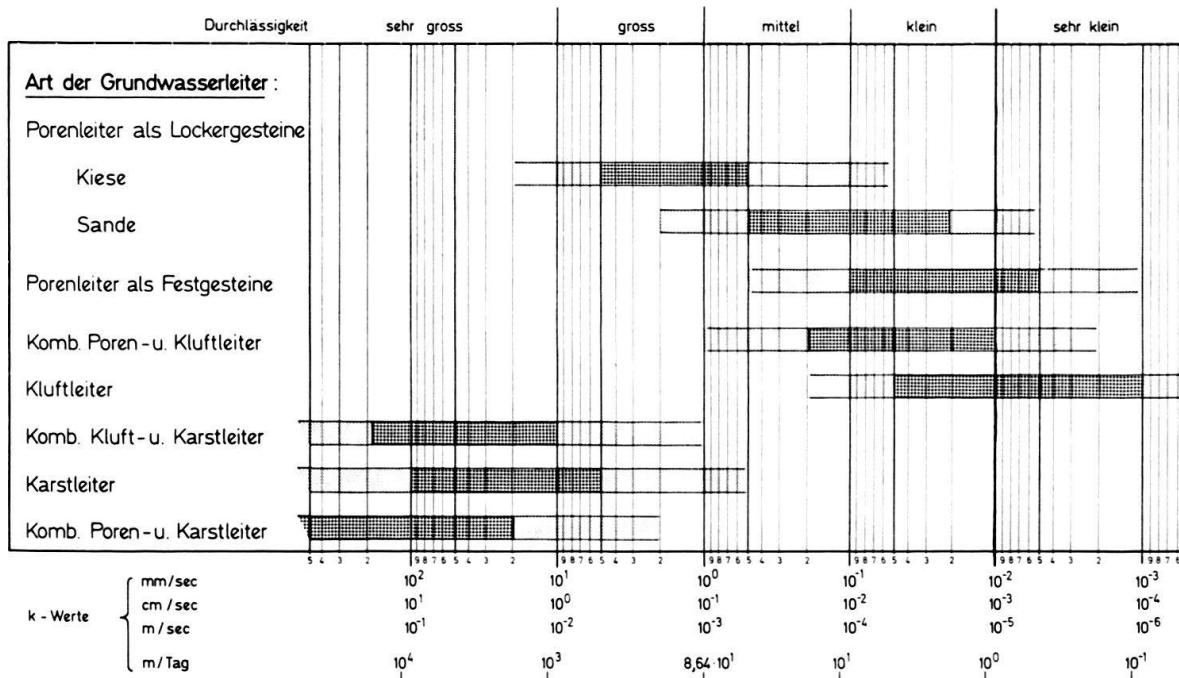


Fig. 2. Versuch einer graphischen Darstellung des Bereiches der Durchlässigkeit bzw. «Wasserwegsamkeit» verschiedener Grundwasserleiter. Dunkel schraffiert: häufiger zentraler Bereich der Durchlässigkeitswerte. Hell schraffiert: randlicher, weniger typischer Bereich.

D. Form des Grundwasserleiters

Als viertes Kriterium zur Klassifikation der Grundwasserleiter dient deren Form als geologische Körper.

In teilweiser Anlehnung an die Klassifikation der Öllagerstätten kann von morphologischen, tektonischen und stratigraphischen Grundwasser-«Fallen» oder -strukturen gesprochen werden.

1. Morphologische Strukturen

Morphologische Strukturen sind besonders bei Porenleitern in Lockergesteinen nahe der Oberfläche anzutreffen, etwa als

- schmale Schotterstränge in der Talsohle (Typus Limmattal),
- isolierte Schotterplateaux (Typus Irchel),
- Bergsturzaflagerungen (Typus Flims),
- Dünen an Meeresküsten (Typus Arcachon).

2. Stratigraphische Strukturen

Stratigraphische Strukturen, – der Ölgeologe würde von Faziesfallen und Diskordanzfallen sprechen –, findet man in fluviatiler Fazies etwa beim Auskeilen eines Kiesel im Übergang zum kieselreichen Sand und Silt, in fluvioglazialer Fazies als verwaschene Partien mit grösserer Durchlässigkeit innerhalb einer sonst wenig durchlässigen Moränendecke, in mariner Fazies als örtlich begrenzte poröse Riffkalke, oder als Diskordanzstrukturen mariner Sande gegen Tone.

Besonders bei oberflächennahen Grundwasserleitern wird der Form des Liegendkontaktes, also der Grundwassersohle, eine spezielle Bedeutung beigemessen, da sie für die zweckmässige Platzierung von Fassungen wichtig sein kann. Ist beispielsweise die Sohle in der Strömungsrichtung wannenförmig ausgebildet, so spricht man von einem «Grundwasserbecken», wobei sich der Begriff «Becken» auf die Form des Liegendkontaktes, nicht auf die Grundwasseroberfläche bezieht.

Zu den stratigraphischen Strukturen kann auch die Bedeckung des Grundwasserleiters gerechnet werden. Grundwasserleiter, die bis an die Oberfläche reichen, werden als unbedeckt bezeichnet. In ihnen ist das Grundwasser vor oberflächlichen Einflüssen schlecht geschützt. Es ist immer ungespannt. Niederschläge erreichen in ihnen das Grundwasser relativ rasch und bewirken einen meist scharfen Anstieg des Grundwasserspiegels.

Bedeckte Grundwasserleiter tragen eine mehr oder weniger schwer durchlässige bis undurchlässige Deckschicht, welche einen meist sehr erwünschten Schutz gegen oberflächliche Verunreinigungen darstellen kann, die Versickerung der Niederschläge jedoch oft erschwert oder sogar verunmöglicht.

Wenn mehrere Grundwasserleiter übereinander liegen und von undurchlässigen Trennschichten voneinander geschieden werden, spricht man von Stockwerkbau, von Grundwasserstockwerken. Verschiedene Stockwerke können sich unterscheiden in Mächtigkeit, Durchlässigkeit, Alter, petrographischer Zusammensetzung, usw.

3. Tektonische Strukturen

Es ist hier nicht der Ort, eine Systematik der tektonischen Strukturen zu entwickeln oder wiederzugeben; das ist Aufgabe der Tektonik.

In kaum einer andern Sparte der Grundwasserkunde kommt aber die Bindung an die reine Geologie so stark zum Ausdruck wie bei der Erfassung und hydrologischen Interpretation tektonischer Strukturen.

4. Lineamentstrukturen

Als besondere Arten tektonischer Strukturen sind die zweidimensionalen tektonischen Elemente, also die Flächen zu werten: Scherflächen, Brüche, Verwerfungen, Überschiebungen, die wir als Lineamentstrukturen bezeichnen. In ihrer hydrologischen Wirkung sind sie relativ unabhängig von den übrigen Strukturen des Grundwasserleiters zu werten, obschon sie stets mit ihnen kombiniert sind.

Dabei ist zu unterscheiden zwischen durchlässigen, verbindenden und dichten, trennenden Strukturen. Durchlässige Lineamentstrukturen bilden Zirkulations-

wege; bei steiler Lagerung erlauben sie oft die Verbindung tiefliegender Grundwasserstockwerke mit der Oberfläche und ermöglichen den Thermalwasseraufstieg und die Bildung von Thermen und Mineralquellen an der Oberfläche. Dichte Lineamentstrukturen stellen eher die Ausnahme dar; sie können als undurchlässige Trennfläche zwei seitlich aneinandergrenzende Grundwasservorkommen hydrologisch trennen.

II. METEOROLOGISCHE KRITERIEN: DIE NEUBILDUNG DES GRUNDWASSERS

Unter Neubildung des Grundwassers versteht man die Versickerung von Niederschlägen oder die Infiltration von Oberflächenwasser in den tieferen Untergrund. Eine Klassifikation von Grundwasservorkommen nach Art, Ausmass und Geschwindigkeit ihrer Neubildung verlangt nach Abklärung der meteorologischen und hydrologischen Zusammenhänge und der Grundwasserbilanz. Figur 3 stellt ein graphisches Schema einer solchen Bilanz dar, wobei über der Horizontalen die «Einnahmen», darunter die «Ausgaben» liegen, während links der Vertikalen die natürlichen, rechts davon die künstlichen Bilanzposten figurieren.

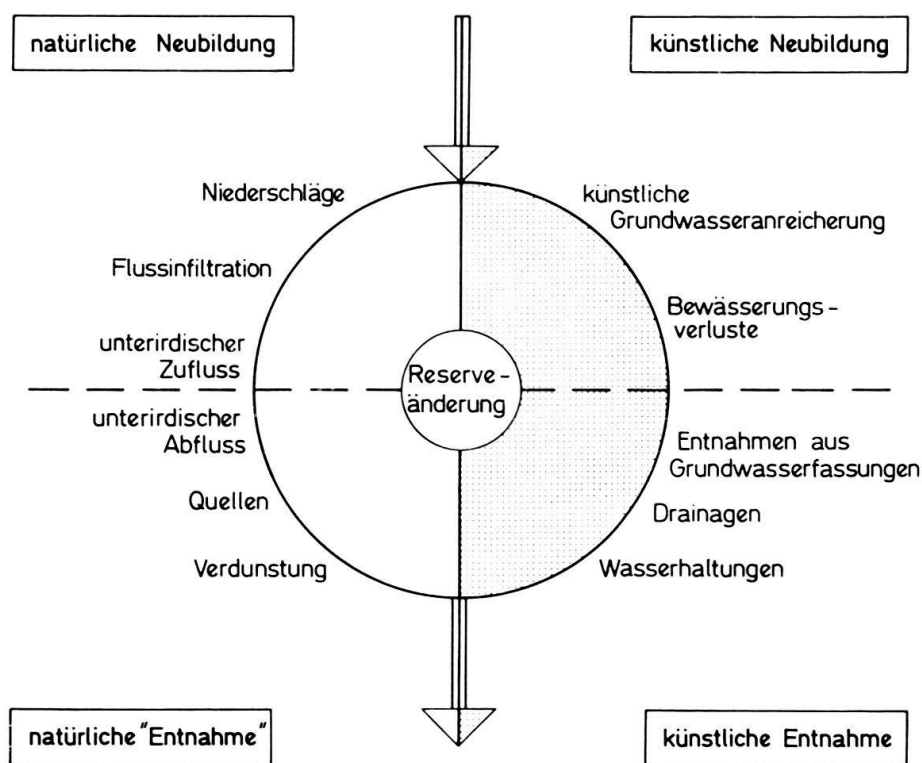


Fig. 3. Graphische Darstellung der verschiedenen Posten einer Grundwasserbilanz.

A. Neubildung durch Versickerung der Niederschläge

In der Regel ist der in den Untergrund versickernde Anteil des Niederschlages die wichtigste Komponente der Neubildung. Man kann dann von «Niederschlagsgrundwasser» sprechen.

Die untenstehende bekannte Gleichung der Wasserbilanz erlaubt im langjährigen Mittel die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen zu berechnen, unter der Voraussetzung, dass Niederschlag, Verdunstung, oberirdischer Abfluss und Vorratsänderung bekannt sind und keine Flussinfiltration stattfindet.

$$A_u = N - V - A_0 - S$$

A_u = unterirdischer Abfluss im Grundwasser

N = Niederschlag

V = Verdunstung

A_0 = oberirdischer Abfluss

S = Vorratsänderung = $\pm$ Speicherung

Unter schweizerischen Klimaverhältnissen erkennt man einen mehr oder weniger ausgeprägten jahreszeitlichen Rhythmus in der Neubildung: Im Winter, als Folge des undurchlässigen Frostbodens und der Niederschläge in fester Form als Schnee, erfolgt keine oder nur eine geringe Neubildung. Im Frühjahr setzt dank der Schneeschmelze eine verstärkte Neubildung ein, die intensiver ist als dem Niederschlag jener Periode entsprechen würde. Im Sommer, bei voll entwickelter Pflanzendecke und belaubtem Wald, wirkt sich die verstärkte Verdunstung aus, die grösser als die Niederschläge sein kann. Kurzfristige Gewitter sind meist ohne Wirkung. Die Neubildung ist gering oder fällt ganz aus. Im Herbst, bei feuchtem, noch nicht gefrorenem Boden, tragen die Landregen sehr wirkungsvoll zur Neubildung bei. Die Folge dieser verschiedenen Wechselwirkungen ist ein entsprechender jahreszeitlicher Rhythmus im Erguss der Quellen und in der Höhe des Grundwasserspiegels bei untiefen Grundwasservorkommen, mit einem frostbedingten Minimum im Winter und häufig einem verdunstbedingten Minimum im Sommer.

Neben diesen meteorologischen Elementen spielen auch topographische Faktoren, – flaches oder steiles Relief –, und geologische Gegebenheiten, – geringe oder grosse Durchlässigkeit der Oberflächenschichten –, und schliesslich die Vegetation für die Neubildung eine Rolle.

Als Summe aller dieser Einzelfaktoren erscheint die «Grundwasserspende» q als Mass der Grundwasserneubildung im Jahresmittel pro Fläche, ausgedrückt in $l/sec \cdot km^2$.

Im langjährigen Mittel sind in unserem Klima folgende Werte der Grundwasserspende für eine Klassifikation anwendbar (Tab. 2):

Tabelle 2

Grundwasserspende in $l/sec \cdot km^2$

sehr klein	$< 1 l/sec \cdot km^2$
klein	$1 - 5 l/sec \cdot km^2$
mittel	$5 - 10 l/sec \cdot km^2$
gross	$10 - 15 l/sec \cdot km^2$
sehr gross	$> 15 l/sec \cdot km^2$

Den wohl reinsten Typus eines Niederschlagsgrundwassers findet man längs Küsten und auf Inseln, wo nach der Formel von HERZBERG im selben Grundwasserleiter eine Grundwasserschichtung mit leichtem Süsswasser über schwerem Salzwasser auftritt (siehe Fig. 4).

$$h/t = \gamma_f / (\gamma_s - \gamma_f)$$

t = Höhe des Süsswassers über dem Meeresspiegel

h = Tiefe des Süsswassers unter dem Meeresspiegel

γ_f = Spezifisches Gewicht des Süsswassers

γ_s = Spezifisches Gewicht des Salzwassers

Zwei chemisch völlig verschiedene Grundwassertypen liegen dann in einem äusserst labilen Gleichgewicht übereinander, ohne dass eine geologische Trennung im Grundwasserleiter bestände. Die Verhältnisse brauchen dabei nicht stationär zu sein; bei einer Verminderung des Süsswassers durch Verdunstung oder einer Vermehrung durch Niederschläge kann sich die Grenze Salzwasser/Süsswasser bedeutend verschieben.

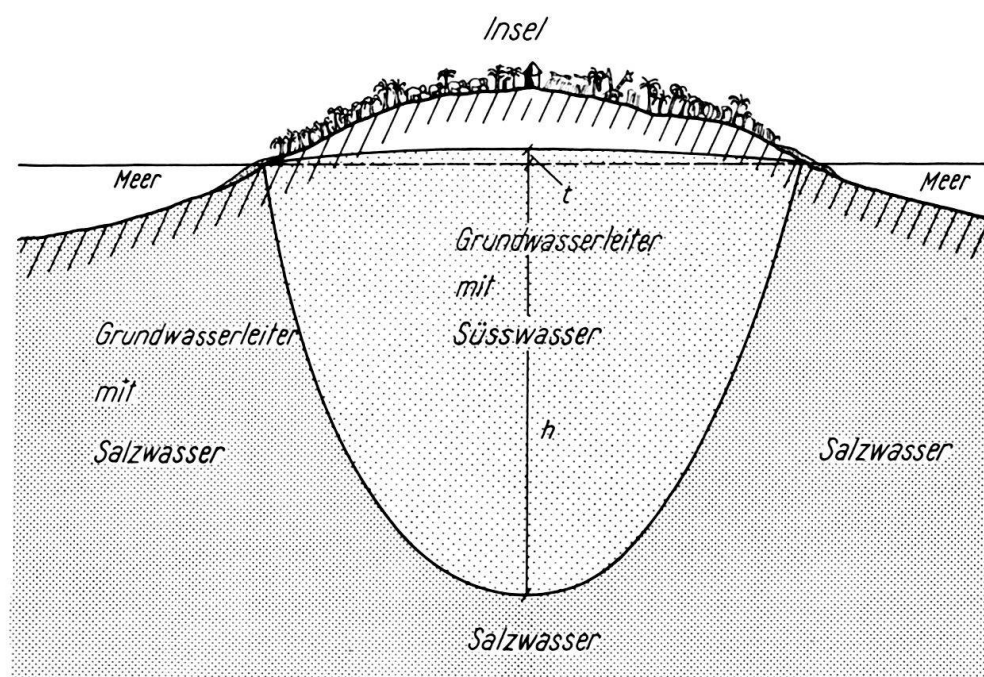


Fig. 4. Schematisches Profil durch eine Insel mit einer Süsswasserlinse, die durch Niederschläge gespeist wird, über Salzwasser (nach HERZBERG).

B. Neubildung durch Infiltration aus Oberflächengewässern

Findet die Grundwasserneubildung durch Infiltration aus Oberflächengewässern statt, so entsteht dabei ein wesentlich anderer Grundwassertyp, der unter Umständen eine sehr grosse Feldergiebigkeit aufweisen kann. Der Begriff der «Grundwasserspende» als Mass der Neubildung pro Fläche ist nicht mehr anwendbar, weil die Neubildung nicht flächenhaft, sondern längs einer Linie dem Oberflächengewässer entlang erfolgt.

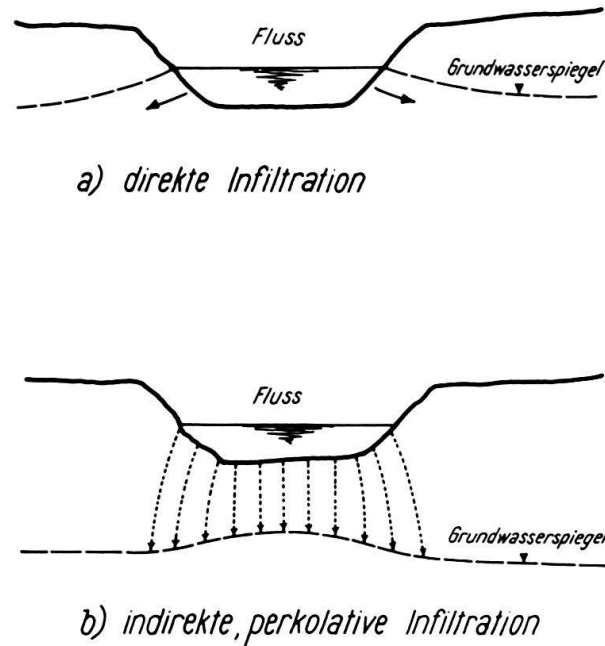


Fig. 5. Typen von Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser.

Man unterscheidet zwei Fälle (siehe Fig. 5):

a) Direkte Infiltration, wobei eine direkte hydraulische Verbindung zwischen Fluss- und Grundwasser besteht, durch welche neben der Strömung auch eine direkte Druckübertragung möglich ist. Unter dem Bett des infiltrierenden Gewässers fehlt eine Bodenluftzone.

b) Indirekte, perkolative Infiltration, die dort eintritt, wo der Grundwasserspiegel wesentlich tiefer liegt als die Flußsohle und das Flussinfiltrat durch die Bodenluftzone hindurch perkoliert, bevor es den ungespannten Grundwasserspiegel erreicht.

C. Grundwasserübertritte, unterirdische Zuflüsse

Der bei Bilanz- und Ergiebigkeitsberechnungen wichtige Faktor des unterirdischen Zuflusses von Grundwasser aus einem Grundwasservorkommen in ein benachbartes stellt gesamthaft betrachtet keine Neubildung, sondern lediglich einen Übertritt dar.

Übertritte gleichen Typus treten dort auf, wo zwei Grundwasservorkommen ähnlicher Art, aber ungleicher Druckhöhe unterirdisch aneinandergrenzen, ohne von einer undurchlässigen Trennschicht gesondert zu sein.

Übertritte ungleichen Typus dagegen finden sich beispielsweise dort, wo Schotter auf Kalk liegt, so dass das im Schotter zirkulierende Porengrundwasser am Kontakt zum Kalk in das darunterliegende Karstwasser übertreten kann oder umgekehrt, je nachdem, welcher Grundwassertyp das höhere Druckniveau aufweist.

D. «Echtes» Grundwasser

Der gelegentlich verwendete Begriff «echtes» Grundwasser kann verschiedene Bedeutungen haben:

- Genetisch, als durch Versickerung der Niederschläge gebildet und dann im Gegensatz zu Infiltrationswasser oder künstlichem Anreicherungswasser verwendet.
- Thermisch, die homotherme Zone mit konstanter Grundwassertemperatur umfassend, im Gegensatz zu oberflächennahem heterothermem Grundwasser mit starken Temperaturschwankungen.
- Zeitlich, im Hinblick auf eine relativ lange Aufenthaltsdauer im Grundwasserleiter.
- Chemisch, indem das echte Grundwasser mit dem Chemismus des Grundwasserleiters annähernd im chemischen Gleichgewicht steht, im Gegensatz zu solchem, das einen dem Grundwasserleiter noch fremden oder noch nicht angepassten Chemismus aufweist.

Eine einwandfreie Abgrenzung gegen das «nicht echte» Grundwasser ist in den allermeisten Fällen kaum möglich, weshalb der Begriff «echtes Grundwasser» nur in seltenen, besonders klar gelagerten und vorher genau zu umschreibenden Fällen verwendet und sonst zweckmässigerweise beiseite gelassen werden sollte.

E. «Fossile» Vorkommen

Als «fossile» Grundwasservorkommen werden gelegentlich solche bezeichnet, bei denen eine Neubildung heute fehlt, die also am Wasserkreislauf nicht sichtbar teilnehmen. Wenn sie trotzdem genutzt werden, so kommt ihre Nutzung auf lange Sicht einem Raubbau gleich.

Bei Grundwasservorkommen mit periodischer Neubildung müsste der Begriff «fossil» zeitlich definiert werden. Umfasst die Zeitspanne fehlender Neubildung bloss einige Monate, was beispielsweise im Mittelmeerklima die Regel ist, oder bloss einige Jahre, was bei oberflächennahen Vorkommen im semi-ariden Halbwüsten- und Wüstengürtel der Fall ist, ist der Begriff «fossiles» Grundwasser ohnehin unangebracht. Wenn aber die Unterbrechung einer Neubildung seit dem Ende der letzten Pluvialperiode andauert, wäre die Verwendung des Wortes «fossiles» Grundwasser mindestens nicht unverständlich, ja im Umgang mit Laien sogar durchaus klar und plastisch, um den Unterschied zu «rezentem», d. h. durch Neubildung immer wieder frisch gespeistem Grundwasser zu betonen. Aber wir besitzen keine Anhaltspunkte, die eine Wiederholung der bisherigen Pluvialperioden ausschliessen; das Gegenteil ist der Fall, der bisher zyklische Ablauf der geologischen Prozesse in Funktion der Zeit lässt auch für die Zukunft neue Pluvialperioden als wahrscheinlich erwarten, bei denen dann die bisher als «fossil» bezeichneten Grundwasservorräte unter heutigen Wüsten eine kräftige Neubildung erfahren könnten.

Einwandfreier schiene der Begriff «fossiles» Grundwasser als Synonym zu «Formationswasser», in der Meinung, dass es sich beispielsweise bei NaCl-haltigem Tiefenwasser um Formationswasser handeln würde, das sich als einstiges Meerwasser in den Poren des marinen Sedimentes erhalten hat. Solches Formationswasser müsste das selbe Alter wie dessen Grundwasserleiter aufweisen, was durch eine absolute Altersbestimmung nachzuweisen wäre. In solchen seltenen Fällen wäre der Begriff «fossiles» Grundwasser unzweideutig definiert.

III. PHYSIKALISCHE KRITERIEN

Zu den physikalischen Kriterien, die zur Klassifizierung der Grundwasservorkommen dienen können, sind die Druckverhältnisse, die Druckschwankungen und die Beziehungen zur Vorflut zu zählen.

A. Druckverhältnisse

Die Klassifikation der Grundwasservorkommen nach ihren hydrostatischen Druckverhältnissen ist naheliegend und in den meisten Fällen ohne grosse Mühe durchzuführen.

1. Sickerwasser

(franz. eau d'infiltration, engl. infiltration water)

Von der Oberfläche gegen den Grundwasserspiegel mehr oder weniger senkrecht abwärts perkolierendes Wasser heisst «Sickerwasser». Ein Druckniveau fehlt. Eine Druckübertragung in ihm ist nicht möglich. Das Wasser zirkuliert in Poren, Klüften oder Karsthohlräumen, die teilweise mit Luft, teilweise mit Wasser gefüllt sind, also in der sog. «Bodenluftzone». Es bildet aber keinen zusammenhängenden Wasserkörper, der wesentlich grösser wäre als die Gesteinsporen oder die Breite der Gesteinsklüfte.

In Stollen und Tunnels erscheint das Sickerwasser als Tropfwasser oder als Stollenquellen im First, an der Brust oder an den Seitenwänden, nicht aber in der Sohle.

2. Schichtwasser

(franz. eau de ruissellement souterrain, engl. gravitational water)

Wo das Sickerwasser auf seinem vertikalen Weg nach unten auf eine weniger durchlässige, somit wasserstauende Schicht von schräger Lage auftrifft, folgt es deren Oberfläche als relativ dünne, unruhig geformte, nicht lückenlose, aber ungespannte Grundwasserschicht mit relativ grossem Gefälle und relativ grosser Fliessgeschwindigkeit. Wir nennen es Schichtwasser. Dessen Form und Gefälle werden durch Form und Gefälle der Sohlschicht bedingt; die Vorflut hat darauf keinen Einfluss. Wo solches Schichtwasser an die Oberfläche oder in einen Stollen oder eine Kaverne austritt, bildet es Schichtquellen.

3. Grundwasser s. str.

(franz. la nappe, engl. groundwater)

Das Grundwasser s. str. weist ein piezometrisches Niveau auf, das durch die Vorflut wesentlich beeinflusst wird, dessen Form relativ ausgeglichen und weitgehend unabhängig von der Form der Grundwassersohle ist, und dessen Gefälle darum meist bescheidener als jenes des benachbarten Schichtwassers ist. Es besitzt eine nennenswerte Mächtigkeit und eine relativ geringe Fliessgeschwindigkeit.

a) Ungespanntes Grundwasser (franz. nappe libre, engl. unconfined groundwater)

Liegt das piezometrische Niveau des Grundwassers noch im durchlässigen Grundwasserleiter und grenzt es nach oben an die Bodenluftzone, so wird das Grundwasser als «ungespannt» bezeichnet.

b) Gespanntes Grundwasser (franz. *nappe captive*, engl. *confined groundwater*)

Wo das piezometrische Niveau des Grundwassers (die sog. «Grundwasserdruckfläche») höher liegt als die Obergrenze eines bedeckten Grundwasserleiters (die sog. «Grundwasserdeckfläche»), wird von «gespanntem» Grundwasser gesprochen. Ein freier, ungespannter Grundwasserspiegel fehlt. Wir unterscheiden zwischen

- subartesisch gespanntem Grundwasser, wo das Druckniveau die Erdoberfläche nicht erreicht, und
- artesisch gespanntem Grundwasser, wo das Druckniveau des Grundwassers höher liegt als die Erdoberfläche. Wird in einem solchen Gebiet die undurchlässige Deckschicht durchstossen, z. B. mittels einer Bohrung oder eines Brunnens, so tritt das gespannte Grundwasser in diesem Loch ohne Pumpen an die Oberfläche und fließt dort als artesischer Brunnen aus.

Auf Figur 6 sind diese verschiedenen Druckzonen in ein und demselben Grundwasserleiter mit Synklinalstruktur, auf Figur 7 mit Isoklinalstruktur dargestellt. Auf Figur 7 wurden zudem noch die für Karstwassergebiete häufig verwendeten speziellen Bezeichnungen angegeben. Es handelt sich um folgende Zonen:

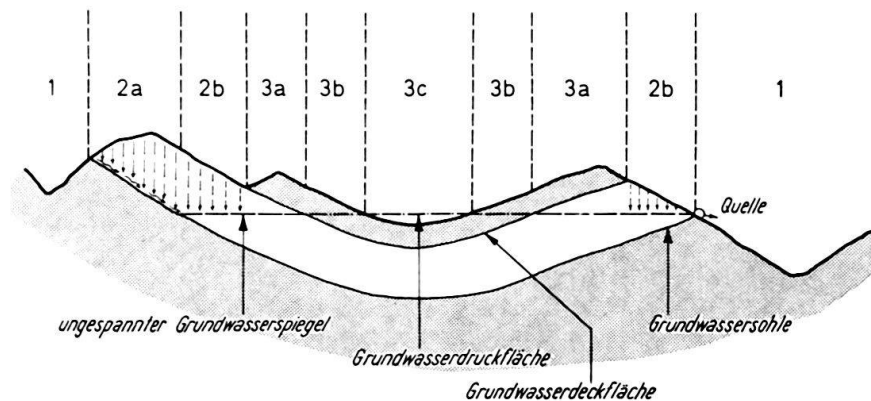


Fig. 6. Querschnitt durch einen Grundwasserleiter mit Synklinalstruktur.

- 1 Undurchlässiger Untergrund, Grundwasserstauer. Das Niederschlagswasser fließt oberirdisch ab, ohne zu versickern.
- 2 Unbedeckter Grundwasserleiter. Einzugsgebiet für Sickerwasser.
 - 2a Schichtwasser über Grundwasserstauer («seichter» Karst ohne Karstwasserspiegel).
 - 2b Unbedecktes Grundwasser s. str. (unbedeckter «seichter» Karst, über «tiefem» Karst mit ungespanntem Karstwasserspiegel).
- 3 Bedeckter Grundwasserleiter.
 - 3a Bedecktes ungespanntes Grundwasser (bedeckter «seichter» Karst, über «tiefem» Karst mit ungespanntem Karstwasserspiegel).
 - 3b Subartesisch gespanntes Grundwasser (subartesisch gespannter «tiefer» Karst).
 - 3c Artesisch gespanntes Grundwasser (artesisch gespannter «tiefer» Karst).

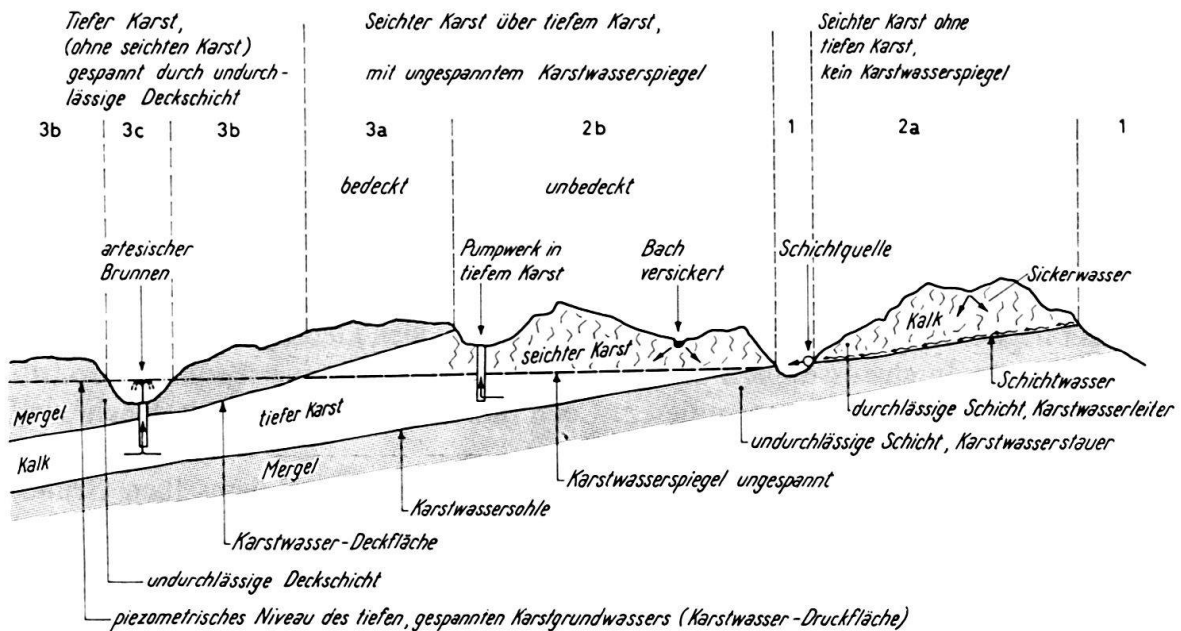


Fig. 7. Querschnitt durch einen Karstgrundwasserleiter mit Isoklinalstruktur.

4. Stockwerkbau

Bei zwei übereinanderliegenden Grundwasserstockwerken müssen bezüglich der Druckverhältnisse folgende vier Fälle unterschieden werden, wobei p_1 der Druck des höheren Stockwerkes G 1, p_2 jener des tieferen Stockwerkes G 2 bedeute (vgl. Fig. 8).

a) Isopiezometrischer, druckgleicher Fall $p_1 = p_2$

Beide Stockwerke besitzen denselben Druck, wie kommunizierende Röhren. Werden solche Verhältnisse in einer Bohrung angetroffen, so ist zu vermuten, dass in der Nähe eine Druckkommunikation vorhanden und folglich der Stockwerkbau unvollkommen ist.

b) Hyperpiezometrischer Fall $p_1 < p_2$

Das tiefere Stockwerk G 2 hat einen höheren Druck als das höhere Stockwerk G 1; das tiefere ist somit unbedingt immer gespannt! In solchen Fällen von Druckungleichheit kann durch aufsteigende Zirkulation das obere Stockwerk G 1 vom unteren Stockwerk G 2 eingespeist werden.

Als Beispiel seien etwa der oberkretazische «Continental intercalaire» unter der nördlichen Sahara genannt, der an Verwerfungen in den Deckschichten höhere Stockwerke speist, wodurch dort Oasen ermöglicht werden; oder der Muschelkalk unter Jura und Molasse des südlichen Faltenjuras, aus welchem die Mineralthermen von Baden und Schinznach-Bad gespeist werden.

c) Hypopiezometrischer Fall $p_1 > p_2$

Das tiefere Stockwerk G 2 hat einen geringeren Druck als das höhere G 1, obwohl es üblicherweise gespannt ist. Es kann somit durch absteigende Zirkulation vom oberen Stockwerk gespeist werden.

Als Beispiel kann die Molasse über verkarstem Malm des schweizerischen und süddeutschen Molassebeckens (LEMCKE) genannt werden.

- d) «Schwebendes» Grundwasser $p_1 \gg p_2$
(franz. nappe perchée, engl. perched groundwater)

Liegt bei hypopiezometrischem Stockwerkbau zwischen höherem und tieferem Stockwerk noch eine Bodenluftzone, so dass das tiefere Stockwerk ungespannt ist, so bezeichnet man das höhere Stockwerk als «schwebend». Oft ist es von nur bescheidener Ausdehnung und geringer wasserwirtschaftlicher Bedeutung; dann wird das tiefere Stockwerk als «Hauptstockwerk» bezeichnet.

Ein instruktives Beispiel beschrieb R. V. CUSHMAN (1968) aus dem Karstgebiet von Kentucky.

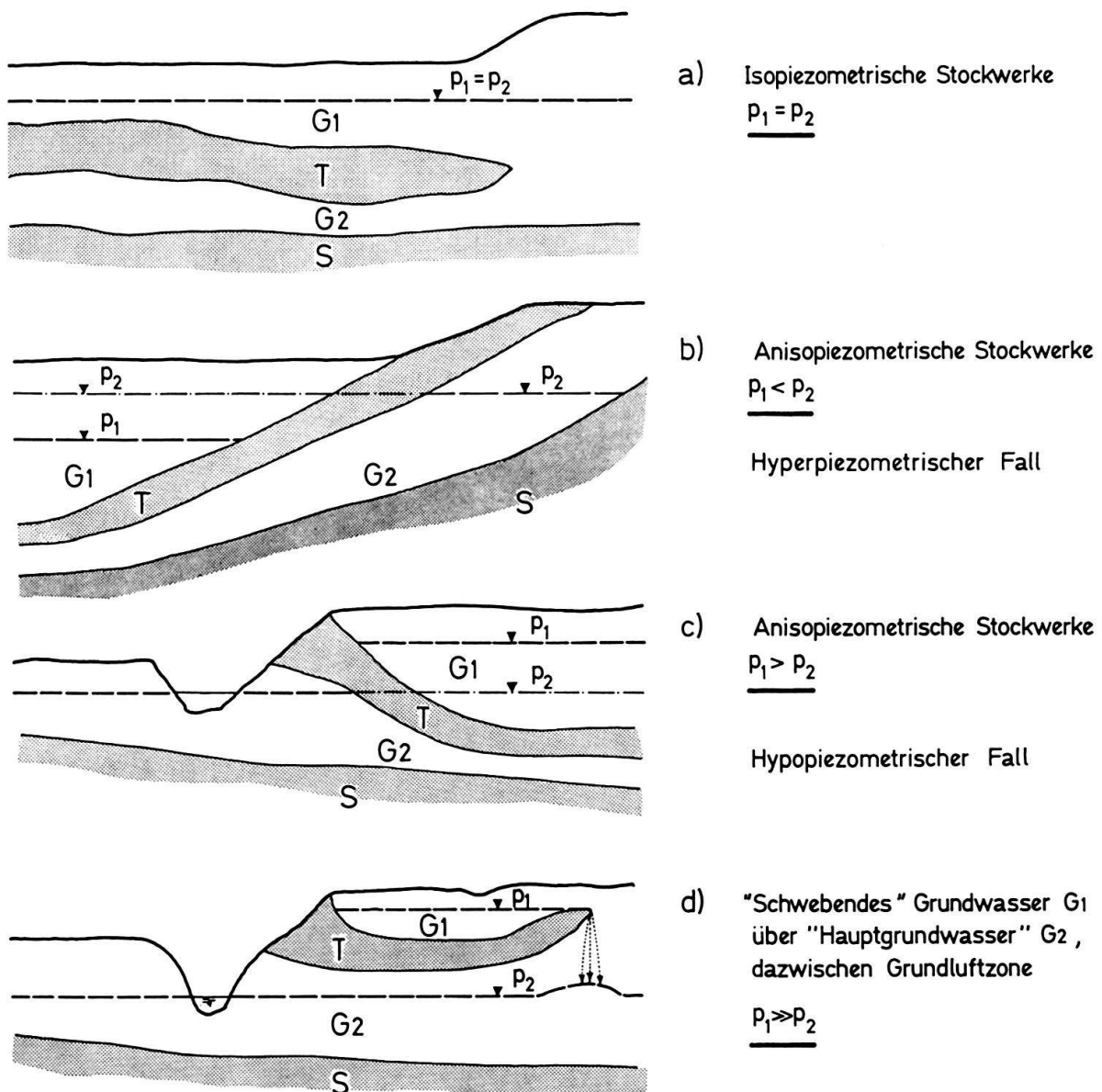


Fig. 8. Grundwasserstockwerke unter verschiedenen Druckverhältnissen. G1 = Oberes Grundwasserstockwerk mit Druckniveau p_1 ; G2 = Unteres Grundwasserstockwerk mit Druckniveau p_2 ; T = Undurchlässige Trennschicht; S = Undurchlässige Sohle unter G2.

Ein Stockwerkbau ist oft auch in der Mineralisation zu erkennen, indem üblicherweise das tiefere Stockwerk höher mineralisiert ist als das höhere, am ausgeprägtesten bei den hochmineralisierten Tiefenwässern. Ausnahmsweise kann das tiefere Stockwerk geringer mineralisiert sein, beispielsweise in einem karbonatfreien unter einem karbonathaltigen Grundwasserleiter, vorausgesetzt allerdings, dass es am Wasserkreislauf überhaupt nennenswert beteiligt ist.

B. Druckschwankungen

Das piezometrische Druckniveau eines Grundwasservorkommens ist kaum jemals konstant, sondern unterliegt charakteristischen Schwankungen, wobei folgende Schwankungstypen unterschieden werden können:

1. Periodische Schwankungen

Als Beispiele periodischer Schwankungen seien genannt:

- Halbtägige Gezeitenperioden in Grundwasservorkommen längs Meeresküsten mit Gezeiten.
- Tagesperioden in Grundwasservorkommen im Gebirge, verursacht durch tägliche Schnee- und Eisschmelze in den Sommermonaten.
- Jahresperioden als häufigste der periodischen Spiegelschwankungen, verursacht durch jahreszeitliche Niederschlagsschwankungen oder durch die Schneeschmelze.

2. Aperiodische Schwankungen

Aperiodische Schwankungen sind naturgemäss viel häufiger. Dazu gehören:

- Kurzfristige Schwankungen mit einer Dauer von Tagen bis Wochen, charakteristisch als Folge aperiodischer Niederschläge bei Grundwasservorkommen mit geringem Flurabstand, oder bei sehr enger Beziehung zu Oberflächengewässern mit aperiodischen Schwankungen in der Wasserführung.
- Mittelfristige Schwankungen mit einer Dauer von Monaten bis einigen Jahren, als Folge aperiodischer meteorologischer Schwankungen.
- Langfristige Schwankungen von der Dauer von Jahren bis Jahrzehnten, durch Klima- oder Vegetationsschwankungen, seltene Überflutungen oder andere seltene meteorologische Ereignisse ausgelöst.

3. Trend

Als Trend bezeichnen wir eine steigende oder fallende, jedenfalls aber gleichsinnige Veränderung des piezometrischen Niveaus während längerer Zeit, die in überblickbarer Zeit nicht rückläufig wird.

Sinkender Trend kann beispielsweise bedingt sein durch kontinuierliche Tieferlegung der Vorflut infolge Tiefenerosion oder durch eine Verringerung der Grundwasserneubildung infolge natürlicher Abdichtung infiltrierender Oberflächengewässer.

Steigender Trend kann verursacht werden durch Erhöhung der Vorflut infolge Aufschotterung.

Sinkender wie steigender Trend können nicht beliebig lang andauern. Wir empfinden oft als Trend, was tatsächlich nur eine gleichsinnige Flanke einer sehr langfristigen, aperiodischen Schwankung ist oder eine einmalige, endliche, zeitlich begrenzte Niveauveränderung darstellt. Unter natürlichen, vom Menschen nicht beeinflussten Verhältnissen ist deshalb der Begriff Trend nur mit Vorsicht anzuwenden.

4. Überlagerungen

In praktisch allen Fällen überlagern sich Schwankungen verschiedenster Art und Ursache, periodische und aperiodische, zu vergleichen etwa mit den Schwankungen des Meeresspiegels an der Küste.

Eine eingehende Analyse der Ganglinien von Grundwasserspiegeln oder von Quellenerträgen kann oft wichtige Zusammenhänge mit dem Einzugsgebiet und mit Ort und Art der Neubildung aufdecken und damit eine einwandfreie Klassifikation des Grundwasservorkommens erleichtern.

Auf Figur 9 sind für das Jahr 1967 je drei Beispiele von Grundwasserganglinien und von Ertragskurven von Moränenquellen aus Zürich dargestellt; die Messungen wurden uns freundlicherweise vom kantonalen Amt für Gewässerschutz bzw. von der Wasserversorgung Zürich zur Verfügung gestellt.

Die Ganglinien von P7 und P «Fürer» zeigen einen zur Limmat analogen Verlauf, wie das für ein Infiltrationsgrundwasser charakteristisch ist; das stärkere Absinken im Spätherbst ist auf intensive Nutzung in den benachbarten Fassungen zurückzuführen. Die Schwankungen im nur durch Niederschläge gespeisten Grundwasser im Beobachtungsrohr 503, abseits der Flussinfiltration, am Hangfuss des Üetlibergs in der Allmend Brunau, zeigen eine deutliche Abhängigkeit zu den Niederschlägen im Frühling und Herbst; die Wirkung der Sommerniederschläge wird durch die Verdunstung weitgehend aufgehoben; die zeitliche Verzögerung beträgt rund 2 Wochen.

Die Ertragskurven der drei Moränenquellen am Üetliberg zeigen in ähnlicher Weise den Einfluss der Niederschläge, wobei wegen der bloss einmonatlichen Messungen die Kurven etwas «eckig» wirken. Die Quelle «Sack» weist starke und kurzfristige, die tiefgründigere Quelle «Hueb J» sehr ausgeglichene Schwankungen auf.

Charakteristisch für 1967 ist die langfristig fallende Tendenz der Quellenerträge.

C. Beziehungen zur Vorflut

Bezüglich des Verhältnisses zur Vorflut lassen sich folgende drei Grundwassertypen unterscheiden (siehe Fig. 10):

1. Indirekte Verbindung

Die Grundwassersohle liegt oberhalb der Vorflut. Die Verbindung zwischen Grundwasser und Vorflut ist eine indirekte, da sich dazwischen ein Abschnitt undurchlässigen Untergrundes, ein Grundwasserstauer einschaltet. Eine Druckübertragung von der Vorflut zum Grundwasser ist nicht möglich, ebensowenig ein Rückstau von der Vorflut ins Grundwasser.

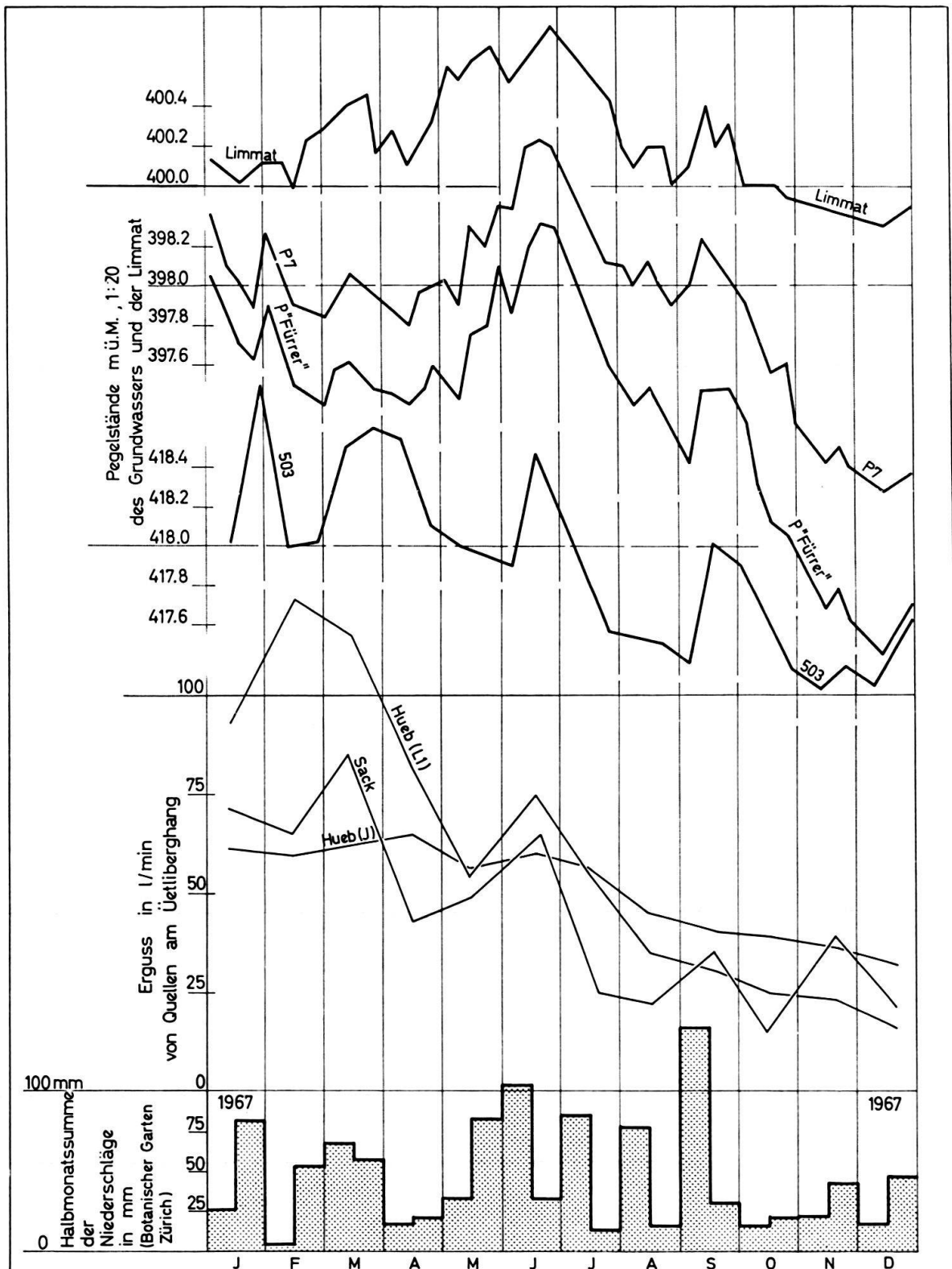


Fig. 9. Ganglinien 1967. Von oben nach unten: Pegelstände der Limmat beim Escher-Wyss-Platz Zürich. P7: Piezometerrohr im Grundwasser beim Escher-Wyss-Platz. P «Fürer»: Piezometerrohr im Geschäftshaus Rud. Fürer Söhne AG, Hardturmstrasse 76. 503: Piezometerrohr in der Allmend Brunau, Hangfuss Üetliberg. Hueb L1, Hueb J und Sack: Erträge von Moränenquellen der Wasserversorgung Zürich am Üetliberg. Daten WVZ. Halbmonatssummen der Niederschläge beim Botanischen Garten Zürich. Daten MZA.

2. Direkte Verbindung

Die Grundwassersohle liegt unter, das piezometrische Niveau des Grundwassers jedoch über der Vorflut. Die Verbindung ist eine direkte. Das Grundwasservorkommen berührt direkt den Vorfluter, so dass vom Vorfluter aus eine Druckübertragung und ein Rückstau auf das Grundwasser möglich ist. Spiegelschwankungen der Vorflut sind im Grundwasser zu verspüren.

3. Bedeckte Verbindung

Grundwassersohle und Grundwasserdeckfläche liegen tiefer als die Vorflut. Das Grundwasser ist gespannt. Die Verbindung mit der Vorflut liegt weit entfernt, beispielsweise wenn für ein Grundwasservorkommen im Binnenland das Meer die Vorflut darstellt. Die Zirkulation des Grundwassers erfolgt meist sehr langsam; man spricht von «Tiefengrundwasser». Die auf Figur 10 dargestellte Skizze vereinfacht die Verhältnisse sehr stark und will lediglich als Schema verstanden sein. Viel kompliziertere Zusammenhänge zwischen «Tiefenwasser» und Vorflut sind die Regel.

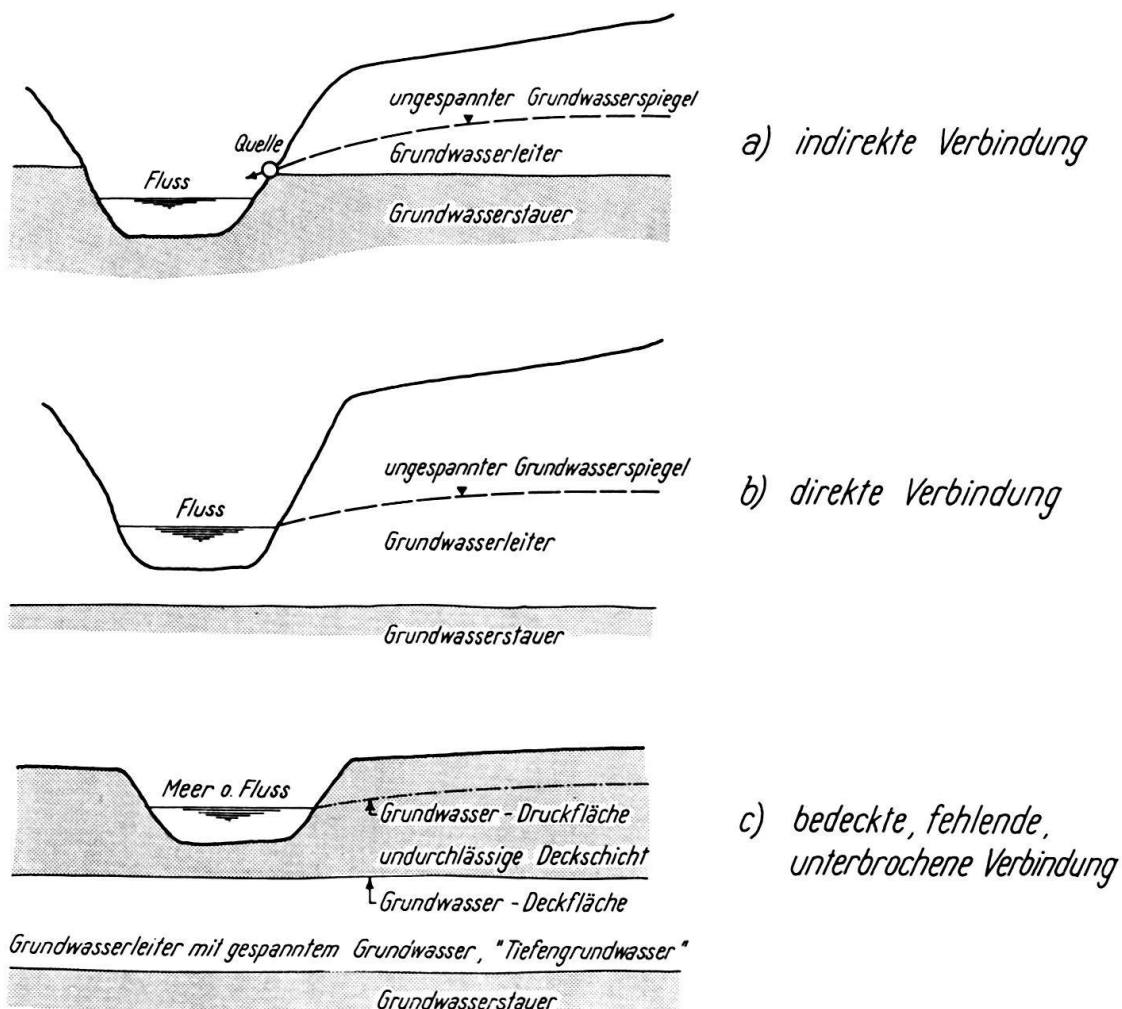


Fig. 10. Beziehungen des Grundwassers zur Vorflut. a) Indirekte Verbindung; die Grundwassersohle liegt oberhalb der Vorflut. b) Direkte Verbindung; die Grundwassersohle liegt unterhalb, das piezometrische Niveau jedoch oberhalb des Spiegels der Vorflut. c) Bedeckte Verbindung; die Grundwassersohle wie auch die Grundwasserdeckfläche liegen tiefer als die Vorflut.

IV. CHEMISCHE KRITERIEN

Die Klassifikation von Grundwasser nach seinem Chemismus ist sehr gebräuchlich und in der Literatur allenthalben anzutreffen.

Dabei müssen zwei Faktoren auseinandergehalten werden:

- Die Gesamtkonzentration, also der Grad der «Mineralisation» im weiteren Sinn, und
- die verhältnismässige Beteiligung der Einzelkomponenten an dieser Gesamtkonzentration.

A. Gesamtkonzentration

Bei der Klassifikation nach GORELL (1958) berechnet man die Gesamtkonzentration als NaCl und gliedert das Wasser nach Zehnerpotenzen mg/l NaCl, gemäss Tabelle 3.

Tabelle 3. Einteilung des Grundwassers nach der Gesamtkonzentration, berechnet als NaCl (nach GORELL 1958)

	mg/l NaCl	mg/l Cl	mval	Gew. %
Süsswasser	< 1000	< 606	< 17,1	< 0,1
Brackwasser	1000– 10000	606– 6000	17,1– 170,9	0,1–1
Salzwasser	10000–100000	6060–60600	170,9–1709,1	1–10
Sole	> 100000	> 60600	> 1709,1	> 10

Unsere schweizerischen Grundwässer liegen nach dieser Klassifikation im Bereich «Süsswasser», die Mineralwässer unserer Heilquellen dagegen oft in den drei anderen Typen. Das aus der Tiefbohrung Pfaffnau-Süd 1 (Kt. Luzern) 1964 aus – 500 m u. M. aus der unteren Meeresmolasse analysierte Wasser ergab einen Gehalt von im Maximum 18000 mg/l NaCl (LEMCKE et al. 1968), ist also als «Salzwasser» zu bezeichnen.

Innerhalb der Gruppe des Süsswassers pflegt man in mitteleuropäischen Klimaverhältnissen die Grundwässer gemäss ihrer Gesamthärte zu klassifizieren, beispielsweise nach KLUT, gemäss Tabelle 4.

Tabelle 4. Einteilung der Süsswässer nach ihrer Gesamthärte (nach KLUT)

	franz. H°	deutsche H°	mval
sehr weich	0 – 7,2	0– 4	0 – 1,4
weich	7,2–14,4	4– 8	1,4– 2,9
mittelhart	14,4–21,6	8–12	2,9– 4,3
ziemlich hart	21,6–32,4	12–18	4,3– 6,4
hart	32,4–54	18–30	6,4–10,7
sehr hart	> 54	> 30	> 10,7

Überschreitet die Gesamthärte 100 franz. ° oder 20 mval, so wird in der Schweiz das betreffende Wasser gemäss «Schweiz. Verordnung über den Verkehr mit Lebensmitteln und Gebrauchsgegenständen, vom 26. Mai 1936» als «Mineralwasser» bezeichnet. Gleiches gilt für Wasser, deren Einzelkomponenten folgende Grenzwerte überschreiten:

Lithium	1 mg/l Li	Eisen	5 mg/l Fe
Fluor	2 mg/l F	Arsen	0,2 mg/l As
Brom	4 mg/l Br	Bor	4 mg/l B
Jod	1 mg/l J	«Säuerling»	250 mg/l CO ₂
«Schwefelwasser» wenn Schwefelwasserstoff (H ₂ S), Hydrosulfid (HS) oder Thio-sulfat (H ₂ S ₂ O ₃) vorhanden sind.			

Für die Definition der Begriffe «Mineralwasser», «Medizinalwasser», «Heilwasser», «Tafelwasser», bzw. «Mineralquelle», «Heilquelle» sind aber nicht bloss geologisch-chemische, sondern auch medizinisch-balneotherapeutische Gesichtspunkte massgebend, weshalb auch die rechtliche Ordnung in den Lebensmittel-, Arzneimittel-, Bergbau- oder Wassergesetzen der verschiedenen Staaten eine sehr unterschiedliche ist (K. FRICKE 1969).

B. Prozentualer Anteil der einzelnen Komponenten an der Gesamtkonzentration

Werden die Grundwasservorkommen nach dem prozentualen Anteil der einzelnen chemischen Komponenten an der Gesamtkonzentration gruppiert, so werden dazu üblicherweise nur relativ wenige Komponenten berücksichtigt.

Hauptkomponenten:

Kationen:	Na ⁺	Anionen:	Cl ⁻	gelöste Gase:	O ₂
	Mg ⁺⁺		HCO ₃ ⁻		
	Ca ⁺⁺		NO ₃ ⁻		
			SO ₄ ⁻⁻		

Nebenkompontenten:

Kationen:	K ⁺	Anionen:	F ⁻	gelöste Gase:	H ₂ S
	Li ⁺		Br ⁻		CO ₂
	NH ₄ ⁺		J ⁻		CH ₄
	Sr ⁺⁺		NO ₂ ⁻		N ₂
	Mn ⁺⁺		H ₂ BO ₃ ⁻		
	Fe ⁺⁺		HPO ₄ ⁻⁻		

Die Nebenkompontenten markieren bei grösserem Anteil bereits Sonderfälle, seien es natürliche Mineral- und Thermalwässer, oder seien es künstlich veränderte, durch Industrieabfälle, Kehrrechtdeponien oder Abwässer oder durch landwirtschaftliche Düngung verunreinigte Grundwässer.

C. Sauerstoffgehalt

Bezüglich des Sauerstoffgehaltes des Grundwassers wird häufig folgende Zweiteilung vorgenommen:

1. «Normaler» Typus mit genügend Sauerstoff, Sauerstoffkonzentration in der Regel 50% und mehr, mit Sulfat und Nitrat, ohne grössere Mengen von gelöstem Eisen und Mangan.

2. «Reduzierter» Typus, bei dem der Sauerstoffgehalt bescheidener ist oder sogar vollkommen fehlt. Dafür treten statt der sauerstoffreichen Sulfate und Nitratsauerstoffärmere oder sauerstofffreie Schwefel- und Stickstoffverbindungen auf, also H_2S statt SO_4 , NO_2 oder NH_4 statt NO_3 . Ferner kann beim «reduzierten» Typus Eisen und Mangan in bedeutend grösserer Masse gelöst sein als beim normalen, sauerstoffreichen Typus.

Der Mangel an Sauerstoff kann verschiedene Ursachen haben:

a) Der Grundwasserleiter enthält organische Stoffe oder grenzt an organische Sedimente, z. B. Torf oder Kohle, die eine Sauerstoffzehrung bewirken.

b) Der Grundwasserleiter ist von einer undurchlässigen Deckschicht überlagert, sodass das Grundwasser in ihm nicht mit Bodenluft in Berührung kommt, was bei tiefen Grundwasserstockwerken oft der Fall ist.

c) Das Grundwasser wird durch Infiltration von organisch belastetem Oberflächenwasser gespeist, was eine sekundäre Sauerstoffzehrung im Grundwasser bewirkt.

d) Organische Stoffe (häusliche, landwirtschaftliche oder industrielle Abwässer, Hauskehricht, Industrieabfälle, Treib- und Schmierstoffe) gelangen als Verschmutzungen ins Grundwasser oder werden vom Sickerwasser durchströmt und ausgelaugt und bewirken eine Sauerstoffzehrung.

D. Beeinflussung des Chemismus durch Flussinfiltration

1. Infolge Mischung

Wo eine Grundwasserneubildung durch Infiltration von Oberflächenwasser stattfindet, zeichnet sich dieser Vorgang auch im Chemismus ab. Handelt es sich um ein sauberes Oberflächengewässer, so führt die Infiltration im Grundwasser üblicherweise zu einer Verdünnung, d. h. einer Verminderung der Mineralisation. Das ist der Normalfall eines Infiltrationsgrundwassers.

Bei starker anorganisch-chemischer Verunreinigung des infiltrierenden Oberflächengewässers, z. B. durch Industrieabwässer, überträgt sich dessen Chemismus als erhöhte Konzentration einzelner Komponenten auf das Grundwasser.

In beiden Fällen lässt sich über eine algebraische Mischungsrechnung das Ausmass der Infiltration abschätzen.

2. Infolge chemischer Reaktion

Ist das infiltrierende Oberflächengewässer jedoch mit organischen Stoffen stark belastet, so führt dessen Infiltration im benachbarten Grundwasser zu einer Sauerstoffzehrung und als Folge davon zu oft komplizierten chemischen Sekundäreffekten, die meist schlecht überblickbar sind und sich durch eine auffallende Instabilität auszeichnen können. Erhöhter Eisen- und Mangangehalt sind dabei häufig anzutreffen.

E. Benennung

1. Benennung nach Millivalprozenten

Für die Benennung der chemischen Grundwassertypen werden die Komponenten in Milligrammäquivalente $mval = \text{Gewicht} \cdot \text{Wertigkeit} / \text{Molekulargewicht}$ pro Liter ausgerechnet und für die Kationen und die Anionen die Äquivalentprozent $mval\%$ getrennt je auf 100% berechnet. (Als gleichwertig mit $mval/l$ wird gelegentlich der Ausdruck $N/1000$ verwendet.) 1 $mval$ ist diejenige Menge eines Stoffes, die $6,0225 \cdot 10^{20}$ Äquivalente enthält.

Für die Benennung werden erst die Kationen, dann die Anionen, die mit mehr als 10 $mval\%$ beteiligt sind, in der Reihenfolge ihrer Häufigkeit angeführt. Ionen mit mehr als 50 $mval\%$ werden dabei unterstrichen, solche mit weniger als 20 $mval\%$ in Klammern gesetzt.

Der weitaus häufigste Grundwassertyp in den Schottern der Schweiz nördlich der Alpen wäre nach dieser Nomenklatur als Ca-Mg-HCO₃-Typ (Kalzium-Magnesium-Hydrogenkarbonat-Typ) zu bezeichnen.

Nach G. MICHEL (1963) lässt sich im rheinisch-westfälischen Steinkohlenebiet von oben nach der Tiefe folgende Sukzession chemischer Grundwassertypen erkennen:

oben (Pleistozän):	ca. 0–100 m	<u>Ca</u> -(Na)-HCO ₃ -SO ₄ -(Cl)-Typ
	ca. 100–200 m	<u>Na</u> - <u>Ca</u> -Cl-SO ₄ -Typ
	ca. 200–300 m	<u>Na</u> -(Mg)-Cl-(SO ₄)-Typ
unten (Karbon):	ca. 300–800 m	<u>Na</u> -Cl-Typ

2. Gliederung nach F. NÖRING

Für eine Gliederung auf chemischer Basis schlug F. NÖRING (1950) folgende vier Typen vor:

1. *Salinarischer Typ*, Chloride, Sulfate und Nitrate dominierend enthaltend, deren Konzentration, unabhängig vom pH und anderen Lösungsgenossen, nur von der Aufenthaltszeit und dem Chemismus der Grundwasserleiter abhängig sind.

2. *Karbonatischer Typ*, dessen Karbonathärte vom pH, dem CO₂-Gehalt und dem Karbonatgehalt des Grundwasserleiters abhängt.

3. *Eisen-Mangan-Typ*, der bei niedrigem pH und beim Fehlen von Erdalkalkarbonaten und von Sauerstoff anzutreffen ist.

4. *Basenarmer Typ*, mit hohem O₂- und CO₂-Gehalt und niedriger Härte, aus erdalkaliarmen Grundwasserleitern stammend.

3. Gliederung nach H. LANGGUTH

H. LANGGUTH (1965, 1966) gibt für die süßen Grundwässer folgende rein chemisch aufgebaute Klassierung:

- I. Normal erdalkalische Süßwässer
 - a) überwiegend hydrogenkarbonatisch
 - b) hydrogenkarbonatisch – sulfatisch
 - c) überwiegend sulfatisch

II. Erdalkalische Süsswässer mit höherem Alkaligehalt

- d) überwiegend hydrogenkarbonatisch
- e) überwiegend sulfatisch

III. Alkalische Süsswässer

- f) überwiegend (hydrogen-) karbonatisch
- g) überwiegend sulfatisch-chloridisch

Im Vierstoff-Diagramm nach HEM (1959) decken diese 7 Typen gemäss Figur 11 klar definierte Parallelegramme.

Die Schottergrundwässer des schweizerischen Mittellandes und des Juras gehören zum Typ Ia: Normal-erdalkalisch – hydrogenkarbonatisch.

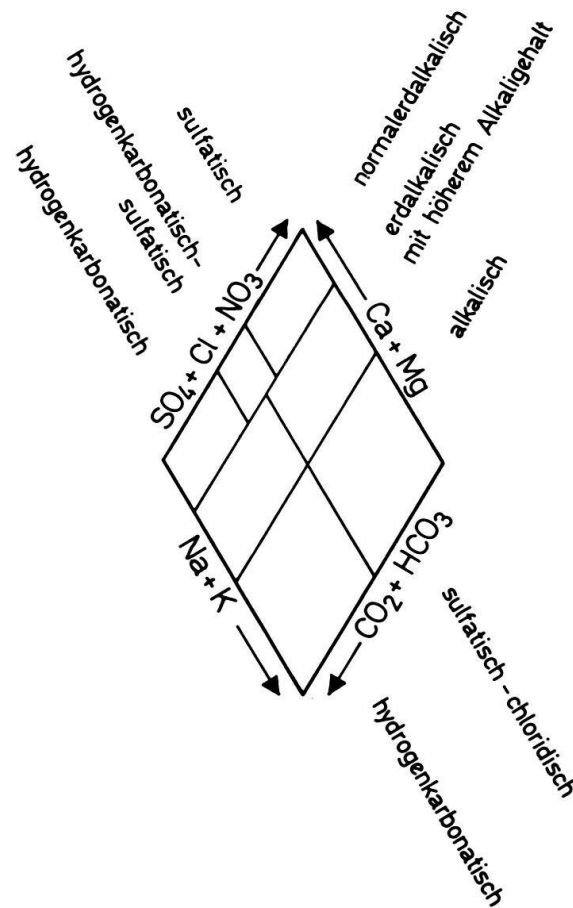


Fig. 11. Vierstoffparallelogramm. Abgrenzung der sieben chemischen Grundwassertypen nach mval%.

Auf Figur 12 wurden im Vierstoffdiagramm, ergänzt durch das Kationen- und Anionen-Dreieck, die Analysen einer grösseren Zahl schweizerischer Mineralwässer dargestellt. Sie lassen sich wie folgt den chemischen Gruppen nach LANGGUTH zuteilen:

I. Normalerdalkalische Süsswässer

Überwiegend hydrogenkarbonatisch: Theophil- und Belvedrasäuerling von Passugg.

Hydrogenkarbonatisch-sulfatisch: Gipsquelle und erdiger Eisensäuerling von San Bernardino.

Überwiegend sulfatisch: Gipstherme Leukerbad, subthermales Gipswasser von Andeer, Lenk.

II. Erdalkalische Süsswässer mit höherem Alkaligehalt

Überwiegend hydrogenkarbonatisch: Subthormaler Eisensäuerling Rhäzüns, Akratotherme Pfäfers-Ragaz, Helenensäuerling Passugg, Bonifazius- und Carolaquelle von Tarasp, Conradin-, Johann- und Thomasquelle von Val Sinestra.

Überwiegend sulfatisch: Schwanen-Schwefeltherme von Baden.

III. Alkalische Süsswässer

Überwiegend karbonatisch: Ulricus- und Fortunatusquelle von Passugg, Emerita- und Luziusquelle, dazu Geysir I und Geysir II von Tarasp, Stampo-Quelle Stabio, Adolf- und Ulrich-Quelle Val Sinestra.

Überwiegend sulfatisch-chloridisch: Therme Zurzach, Eglisau, Schwefeltherme Lavey-les-Bains, Verena-Schwefeltherme Baden, Grottino-, Nuovi Bagni und San Pancrazio-Quelle Stabio.

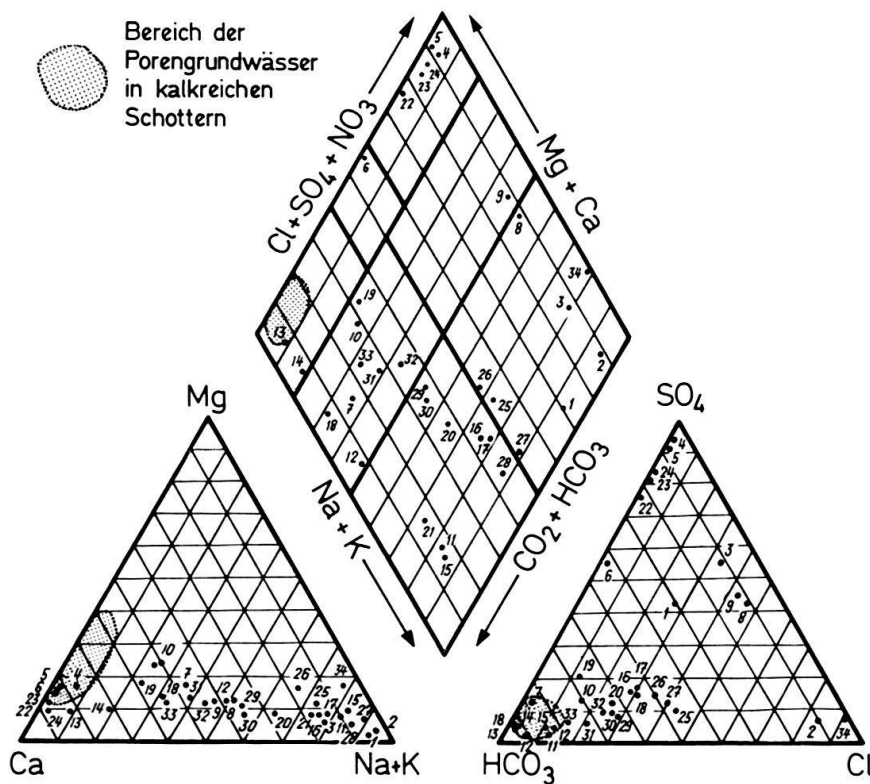


Fig. 12. Chemismus schweizerischer Mineralwässer, in mval%.

1 Zurzach	13 Passugg, Theophil	25 Stabio, Grottino
2 Eglisau	14 Belvedra	26 Nuovi Bagni
3 Lavey-les-Bains	15 Fortunatus	27 San Pancrazio
4 Leukerbad	16 Tarasp, Emerita	28 Stampo
5 Andeer	17 Luzius	29 Val Sinestra, Adolf
6 San Bernardino	18 Bonifazius	30 Ulrich
7 Rhäzüns	19 Carola	31 Conradin
8 Baden, Verena	20 Geysir I	32 Johann
9 Schwanen	21 Geysir II	33 Thomas
10 Ragaz	22 Lenk, Hohlieb	34 Meerwasser
11 Passugg, Ulricus	23 Bahn	(zum Vergleich)
12 Helenen	24 Eisen	

Wie jede Einteilung, die sich auf scharf definierte Grenzen stützt, vermag auch die vorliegende nicht zu vermeiden, dass Grenzen quer durch geologisch unbedingt zusammengehörende Quellgruppen verlaufen, deren Chemismus nur wenig differiert. Das ist der Fall bei der Verena- und der Schwanenquelle von Baden oder bei den Quellen von Stabio oder von Val Sinestra.

Im Kationen-Dreieck von Figur 12 fehlen Mg-reiche Wässer. Trotz dem reichlichen Vorkommen dolomitischer Gesteine, die als Grundwasserleiter wirken könnten, scheinen auch in der Schweiz magnesiumreiche Mineralwässer sehr selten zu sein.

Abschliessend sei daran erinnert, dass auch die chemischen Kriterien, ähnlich wie die meteorologischen und physikalischen, oft nennenswerten Schwankungen in Funktion der Zeit unterworfen sind, was sich selbstverständlich für die Klassifikation der Grundwasservorkommen erschwerend auswirkt.

V. KORRELATIONEN

Im Vorangehenden wurden die verschiedenen Klassifikations-Kriterien betont analytisch behandelt. Nun sollen sie noch miteinander in Beziehung gebracht, in synthetischer Weise korreliert werden. Als Korrelationen im Sinne einer Grundwassertypologie seien Beziehungen zwischen Elementen einzelner Klassifikations-Kriterien verstanden, die sich gegenseitig verlangen.

A. Einfache Korrelationen

Als erstes Beispiel sei ein hochgelegener, allseitig isolierter Porengrundwasserleiter auf einem Hochplateau angenommen, wie sie in der Nordschweiz etwa die Erosionsrelikte von durchlässigen Deckenschottern auf undurchlässiger Molasse darstellen. Nach dem Tafelberg östlich der Mündung der Töss in den Rhein verwenden wir dafür die Kurzbezeichnung «Typus Irchel».

Eine einfache Korrelation besteht zwischen morphologischer Struktur und Grundwasser-Neubildung: Die Neubildung des Grundwassers erfolgt ausschliesslich durch Versickerung der Niederschläge; eine Speisung durch Infiltration von Flusswasser ist unmöglich, ebenso ein unterirdischer seitlicher Zustrom.

Eine weitere einfache Korrelation ist zwischen morphologischer Struktur und Druckverhältnissen zu erkennen, indem es sich nur um Schichtwasser und ungespanntes Grundwasser mit natürlicher Entwässerung auf der Sohle in Form von Schichtquellen handelt; druckgespanntes oder gar artesisches Wasser ist unmöglich.

Schliesslich ist auch eine einfache Korrelation zwischen Grundwasserleiter und Chemismus des Wassers vorhanden, denn in den kalkreichen Schottern des Alpenvorlandes kann sich nur ein erdalkalisch-hydrogenkarbonatisches hartes Wasser bilden; alkalische, sulfatische oder chloridische Wässer sind unmöglich.

B. Mehrfache Korrelationen

Neben diesen einzelnen einfachen Korrelationen besteht selbstverständlich die Möglichkeit von mehrfachen Korrelationen, die dann einem ganz spezifischen Grundwassertyp das Gepräge geben.

Wenn also zwischen Art, mineralogischer Zusammensetzung und Struktur des Grundwasserleiters, der Neubildung, den Druckverhältnissen und dem Chemismus des Grundwassers enge, obligatorische Beziehungen bestehen, pflegt man von einem «Grundwassertyp» zu sprechen. Als Beispiel seien nochmals die nordschweizerischen Deckenschotter vom «Typus Irchel» angeführt, für welche die ausführliche Typencharakteristik als Vollbezeichnung lauten würde:

«In einem unbedeckten, karbonatreichen Porengrundwasserleiter grosser Durchlässigkeit als hochgelegene, allseitig isolierte Schotterdecke liegt ein Grundwasser, das ausschliesslich durch Niederschläge gespeist wird und eine mittelgrosse Grundwasserspende abgibt; es ist ungespannt und beliefert an seiner Sohle harte Schichtquellen von erdalkalisch-hydrogenkarbonatischer Zusammensetzung und normalem Sauerstoffgehalt.»

Das Vorhandensein solcher mehrfacher Korrelationen, nicht nur in den Porengrundwasserleitern, sondern ebenso sehr im Kristallin mit seiner reinen Kluftzirkulation oder auch im Kalk mit den recht verwirrenden Karstphänomenen, erlaubt es auf hydrogeologischen Karten mit relativ wenig Farben und Signaturen auszukommen.

C. Gestörte Korrelationen. Mischtypen

Die Erfassung der Zusammenhänge führt aber nicht selten statt zu klaren, einfachen Grundwassertypen, zu eher abnormen, seltenen Sonderfällen oder Mischtypen. Die Ursachen solcher gestörter Korrelationen können geologischer oder hydrologischer Art sein.

Geologische Faktoren gestörter Korrelationen sind beispielsweise eine sehr kleine horizontale oder vertikale Ausdehnung, eine uneinheitliche, auf kurze Distanz stark wechselnde lithologische Zusammensetzung, oder aber sehr komplizierte tektonische Strukturen der Grundwasserleiter.

Aus hydrologischen Gründen können die Korrelationen gestört sein, wenn Grundwasser vom einen Leiter zum andern übertritt, wobei dann unter Umständen der Chemismus des Wassers nicht mehr mit der Mineralogie des neuen Leiters übereinstimmt. Solche chemisch gestörten Korrelationen hat man z. B. bei Solewanderungen längs Thermalwasserspalten oder bei der vermuteten Migration hochmineralisierter Salzwässer in der unteren Süsswassermolasse des voralpinen Molassebeckens anzunehmen.

D. Beispiele

Bei verschiedenen bisherigen Vorschlägen für eine Typengliederung des Grundwassers handelt es sich um die Erfassung von Korrelationen im vorstehenden Sinn, was die folgenden Beispiele belegen mögen.

1. Vorschlag L. GERB

L. GERB (1956) definiert seine Grundwassertypen von Bayern wie folgt: «Von einem «Grundwassertyp» wird im folgenden dann gesprochen, wenn sich zwischen den Eigenschaften chemisch gleichartiger Wässer und denen des geologischen Körpers, aus dem sie stammen, eine eindeutige Zuordnung herstellen lässt». Nach unserer

Nomenklatur würde das einer einfachen Korrelation zwischen Grundwasserleiter und Chemismus entsprechen. Er gliedert die Grundwässer Bayerns in 5 Typen:

a) «*Kalkschotterwässer*», in den ausgedehnten kalkreichen pleistozänen Schottern des Alpenvorlandes und der schwäbisch-bayrischen Hochebene als sehr durchlässigen Porengrundwasserleitern, mit hoher Karbonathärte, hohem pH, mit «normalem» oder «reduziertem» Chemismus, in letzterem Fall ohne Sauerstoff, dafür mit NH_4 , NO_2 , evtl. sogar H_2S , Fe und Mn.

b) «*Wässer der oberen Süsswassermolasse*», aus den kalkhaltigen Quarzsandsteinen und Quarzkonglomeraten als Kluftgrundwasserleiter, mit mittलगrosser Karbonathärte, stets mit normalem Sauerstoffgehalt, ohne reduzierten Typus.

c) «*Kalkalpenwässer*», mit den durchlässigen alpinen Kalken und Dolomiten als Karstgrundwasserleiter (die Gips- und Salzlager der alpinen Trias sind davon ausgenommen), mit mittलगrosser Karbonathärte und stets reichlich Sauerstoff; der reduzierte Typus fehlt.

d) «*Kristallinwässer*», aus dem Kristallin als Kluftgrundwasserleiter, mit sehr niedriger Karbonathärte, einem Überschuss an freier Kohlensäure, niedrigem pH, hohem Sauerstoffgehalt als «normalem» Typus. Der «reduzierte» Typus fehlt.

e) «*Schlierwässer*», mit den mergelreichen Schichten der marinen Molasse als tief-liegende Kluftgrundwasserleiter, daher meist artesischer Aufstieg in Brunnen aus grosser Tiefe mit erhöhter Temperatur. Sehr geringe Karbonathärte, hoher Natrium- und Kaliumgehalt, viel Chlorid, viel Kieselsäure, hohes pH, sauerstofffrei, stets als «reduzierter» Typ, mit NH_4 , H_2S und häufig Fe und Mn, gelegentlich mit CH_4 .

2. Vorschlag H. FAST und K. SAUER

Eine im Prinzip sehr ähnliche Typologie mit starker Betonung des Chemismus schlagen H. FAST und K. SAUER (1958) für südbadische Grundwässer vor. Sie bezeichnen sie wie folgt:

a) «*Mineralarme Grundgebirgs- und Kristallinwässer*». Es handelt sich um Porengrundwässer im geringmächtigen kalkfreien Verwitterungsschutt mit geringer Speicherwirkung, seltener um Kluftgrundwässer. Sie sind sehr weich, im O_2 -Gehalt meist «normal», selten «reduziert». Kennzeichnend sind sehr niedriger Cl-, NO_3 - und SO_4 -Gehalt, vielfach hoher PO_4 -Gehalt, CO_2 -Überschuss.

b) «*Buntsandsteinwässer*». Es sind Kluftgrundwässer, untergeordnet kombiniert mit Porengrundwässern. Sie sind weich, bezüglich O_2 kommen sowohl der Normaltyp wie der «reduzierte» Typ vor. Kennzeichnend sind niedriger Cl-Gehalt, auch meist niedriger NO_3 -Gehalt, mittlerer bis hoher PO_4 -Gehalt, geringer SO_4 -Gehalt, CO_2 -Überschuss.

c) «*Muschelkalk-Karbonatwässer*». Es handelt sich um Karst-/Kluftgrundwässer. Sie sind hart bis sehr hart, zeigen den Normaltyp und «reduzierten» Typ, der Cl- und NO_3 -Gehalt ist niedrig bis mittelhoch, der PO_4 -Gehalt niedrig, z. T. ist CO_2 -Überschuss vorhanden.

d) «*Erdalkali-Sulfatwässer*». Aus Gipskeuper und mittlerem Muschelkalk stammend, als Kluftgrundwässer (wohl kombiniert mit Karstwässern) hart bis sehr hart, meist «reduziert», mit hohem SO_4 -Gehalt, mittlerem Cl- und NO_3 -Gehalt, niedrigem PO_4 -Gehalt, z. T. mit CO_2 -Überschuss.

e) «*Infiltrationswässer*». Porengrundwässer in den Schottern der Talsohle, chemisch uneinheitlich, im Gebirgsinnern sehr weich mit geringem Cl-, NO₃- und SO₄-Gehalt, im Rheintal härter, teilweise mit sehr hohem PO₄-Gehalt; meist «reduzierter» Typus.

Diese Typisierungsvorschläge erscheinen zweckmässig für das betreffende begrenzte Gebiet, doch könnte es schwierig sein, sie auf andere Gebiete übertragen zu wollen. Eine nur lokale Anwendungsmöglichkeit muss ihnen angelastet werden.

Die Nomenklatur, sicher bloss von sekundärer Bedeutung, wirkt zudem etwas zu pragmatisch, obschon die einzelnen Namen durch ihre Kürze bestechen und dem Fachmann leicht verständlich sind. Sie ist insofern auch inkonsequent, als teils lithologische, teils stratigraphische, teils tektonische und teils rein chemische Namen von ein und demselben Autor zur Typisierung verwendet werden.

E. Abgrenzungs- und Nomenklaturfragen

1. Kurzbezeichnungen

Dem Kenner der Lokalverhältnisse wäre mit einem treffenden Lokalnamen als Kurzbezeichnung für einen einwandfrei definierbaren Grundwassertyp aus Zweckmässigkeitsgründen sehr gedient. Aber ähnlich wie in der Stratigraphie müsste die Typuslokalität und alle übrigen Kennzeichen genau definiert werden. Als Beispiel möge der «Typus Irchel» (Seite 419) nochmals in Erinnerung gerufen werden.

Kurzbezeichnungen bieten aber folgende Schwierigkeiten:

- Der Nichtfachmann wie auch der Ortsfremde können ohne einlässliche Detailbeschreibung mit einer Kurzbezeichnung allein nichts anfangen. Eine ausführliche Definition ist als Ergänzung unumgänglich.
- Bezieht sich die Kurzbezeichnung auf einen Grundwassertypus mit mehrfachen Korrelationen, so taucht die Frage auf, wie straff die Definition zu handhaben sei, ob alle Einzelkorrelationen mit demselben Gewicht zu berücksichtigen seien und von welchem Ausmass einer Abweichung an die Kurzbezeichnung nicht mehr toleriert werden dürfe, kurz, alle Probleme der Abgrenzung. Darf ein Schotterrest eines kalkfreien Quarzitkonglomerates von der Struktur des Irchels, aus welchem nicht harte, sondern weiche Schichtquellen ausfliessen, auch noch als «Typus Irchel» bezeichnet werden? Wenn nicht, wo soll die chemische Grenze gezogen werden? Oder wenn es sich statt um ein Schotterrelikt um ein Erosionsrelikt einer Kalkhochfläche handelt, an deren Basis harte Kluftquellen austreten? Oder wenn es sich beim erwähnten Erosionsrelikt um eine Basaltdecke handelt, an deren Basis weiche Kluftquellen austreten (vgl. Fig. 13).
- Die Stellung in der Hierarchie der Ordnungsbegriffe ist aus der Kurzbezeichnung allein nicht ohne vorherige Erläuterung zu erkennen. Wie eng begrenzt, bzw. wie weit umfassend die Kurzbezeichnung zu verstehen ist, müsste deshalb in ihrer Definition festgehalten werden.
- Überlappungen verschiedener Typen und Untertypen sind aus einer Kurzbezeichnung nicht zu ersehen. Wenn bei mehrfachen Korrelationen jeweils lediglich eine einzelne einfache Korrelation variiert, die andern aber erhalten bleiben, entsteht eine Reihe von Untertypen, die sich durch die variierenden einfachen Korrelationen

unterscheiden, die konstant erhaltenen Korrelationen aber gemeinsam besitzen und durch diese zu einem Haupttyp zusammengefasst bleiben. Die oben erwähnten, auf Figur 13 dargestellten verschiedenartigen Untertypen zum Typus «Irchel» mögen als einfaches Beispiel dienen.

Das Relikt aus Quarzitschotter, «Typus Taunus», liefert gegenüber dem Kalkschotter des Irchels Schichtquellen eines anderen Chemismus, nämlich weiches Wasser, weist also gegenüber dem Typus Irchel lediglich gewisse chemische Differenzen auf. Das Relikt aus geklüftetem Kalk «Typus Geissberg» zeigt weniger chemische Unterschiede als solche in der Art der Wasserzirkulation, nämlich Kluft- statt Porenzirkulation. Beim Basaltrelikt «Typus Vogelsberg» schliesslich ist der Chemismus wie die Zirkulationsart anders als beim «Typus Irchel». Aber allen vier Untertypen ist gemeinsam die morphologische Struktur des Grundwasserleiters als hochgelegener, flacher, isolierter Erosionsrest, die Neubildung einzig durch Niederschläge, und schliesslich die Druckverhältnisse mit dem Fehlen von druckgespanntem Grundwasser, sowie die natürliche Entwässerung in randlichen Schichtquellen.

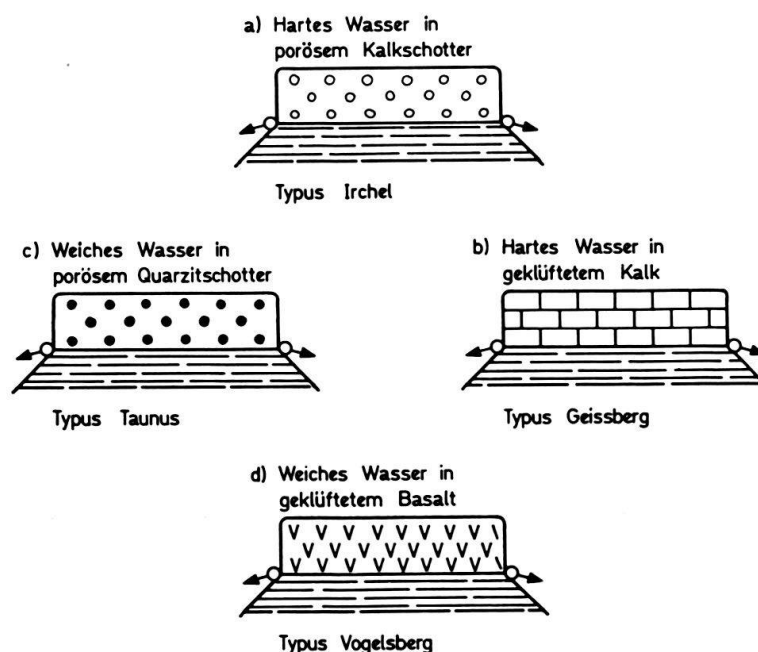


Fig. 13. Schematische Darstellung von 4 Grundwasserleitern als Tafelberge mit randlicher Entwässerung in Schichtquellen, die sich nur entweder in der Art der Zirkulation oder aber im Chemismus unterscheiden, während alle übrigen Kriterien konstant bleiben.

2. Vollbezeichnungen

Eine «Vollbezeichnung» soll sich, im Gegensatz zur Kurzbezeichnung, von Lokalnamen freimachen und völlig neutral Aufschluss geben über

- den Grundwasserleiter, dessen Art der Zirkulation, dessen mineralogische Zusammensetzung, Durchlässigkeit und Struktur;
- die Neubildung des Grundwassers, deren Art und Ausmass;
- die Druckverhältnisse und ihre Schwankungen;
- die chemischen Verhältnisse.

Für den relativ einfachen Fall des «Typus Irchel» wurde die Vollbezeichnung bereits auf Seite 419 im Zusammenhang der mehrfachen Korrelation gegeben; er sei hier nicht wiederholt. Als Beispiel eines ganz anderen Grundwassertyps sei die Vollbezeichnung für das Sickerwasser in einem Kraftwerkstollen bei Andeer, Kt. Graubünden, angeführt:

«In einem unbedeckten Kluftwasserleiter mittelgrosser Durchlässigkeit als Kristallindecke granitischer Zusammensetzung, die vom benachbarten Rhein als Vorflut in 1000 m tiefem Einschnitt gequert wird, zirkuliert Kluftwasser, das im Sommer und Herbst durch Niederschläge, im Frühjahr durch Schneeschmelze gespeist wird; im Winter findet keine Neubildung statt. Kluftquellen zeigen im Jahresrhythmus ein Frostminimum im Winter und ein Schmelzmaximum im Frühling und sind chemisch als sehr weiches, kalkaggressives Kristallinwasser mit CO₂-Überschuss zu taxieren.»

Vollbezeichnungen weisen neben ihrem unangefochtenen Vorteil der Vollständigkeit den Nachteil einerseits einer gewissen Schwerfälligkeit und einer nennenswerten Raumbeanspruchung, anderseits einer systematischen Unübersichtlichkeit auf, die allerdings durch sprachlich-stilistische Betonungen und Ausschmückungen gemildert werden kann.

3. Chiffrierung

Zwischen der «Kurzbezeichnung» und der ausführlichen «Vollbezeichnung» könnte man sich als Zwischenlösung eine «Chiffrierung» denken, indem jede Eigenschaft, jedes typische Kennzeichen eines Grundwasservorkommens durch eine Zahl oder einen Buchstaben bezeichnet würde.

Eine solche Chiffrierung hätte folgende Vorteile:

- Der Beschreiber wäre gezwungen, systematisch jedes einzelne Kriterium zu beurteilen und kurz und prägnant zu beschreiben.
- Die Chiffrierung könnte international normiert werden, würde die Übermittlung wissenschaftlichen Gedankengutes auch über Sprachgrenzen hinweg erleichtern und würde eine vereinfachte und vereinheitlichte Fixierung auf Lochkarten oder analogen Hilfsmitteln ermöglichen.
- Die Chiffrierung erleichtert die systematische Gliederung in Gruppen und Untergruppen, lässt die gegenseitige Überlappung leicht erkennen, lässt visuell erfassen, was bei einer grossen Anzahl von einzelnen Vorkommen gleich und was verschieden ist.

Ungeachtet dieser offensichtlichen Vorteile hat aber jede Chiffrierung den Nachteil, dass sie vom Absender und Empfänger den selben Chiffrierschlüssel verlangt, und dass sie vom Nichtbesitzer des Schlüssels nicht gelesen werden kann.

Ansätze einer solchen Chiffrierung findet man auf der Hydrogeologischen Karte der Tschechoslowakei 1:500000, erschienen 1967: Auf den farbig belegten Flächen, welche stratigraphisches Alter und Lithologie der Grundwasserleiter darstellen, werden mit römischen Ziffern, Grossbuchstaben, arabischen Ziffern und Kleinbuchstaben die Nummer der Wasserwirtschaftssektion, die stratigraphisch-geologische Einheit, die geographische Region und schliesslich Art der Wasserzirkulation und der Grossstruktur des Grundwasserleiters angeschrieben. Mit der Schriftgrösse schliesslich wird die Feldergiebigkeit dargestellt, – eine ungewöhnlich originelle Anregung!

4. Vorschlag für eine Chiffriermethode

Die im folgenden hier vorgeschlagene Chiffriermethode bezieht sich auf die Gliederung der Kriterien einer Grundwasserklassifikation, wie sie im vorliegenden Aufsatz dargestellt werden.

Die vollständige Chiffre besteht gemäss diesem Vorschlag aus 13 Stellen, die unter sich durch Komma getrennt werden, wobei jedes Kriterium eine Stelle belegt, die in der gleichen Reihenfolge wie in den vorangegangenen Kapiteln angeordnet werden. Kombinationen werden durch ein +-Zeichen markiert. Eine nicht benützte oder unbekannte Stelle wird mit x bezeichnet. Untergeordnete oder nur gelegentlich auftretende Komponenten oder Kriterien werden in Klammern gesetzt.

Die 13 Stellen werden gemäss den Hauptkriterien in 4 Gruppen, umfassend Grundwasserleiter, Neubildung, Physik und Chemie zusammengefasst, die durch einen Schrägstrich getrennt werden, so dass schliesslich folgendes Schema entsteht:

1, 2, 3, 4 / 5, 6 / 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 13.

Erste Gruppe: Grundwasserleiter

Erste Stelle:	Art der Zirkulation: Grossbuchstaben	
	Porenzirkulation	P
	Kluftzirkulation	F
	Karstzirkulation	K
Zweite Stelle:	Mineralogie des Grundwasserleiters: Kleinbuchstaben	
	karbonatreich	c
	gipsreich	g
	salzreich, Na Cl-haltig	s
	quarzreich	q
	alkalisilikatreich	a

Dritte Stelle: Durchlässigkeit: Zahl, ungefähr dem Exponentialfaktor des k-Wertes in m/sec entsprechend, vgl. Tabelle 1, Seite 396

sehr gross	$k > 10^{-2}$ cm/sec	1
gross	$k = 10^{-2}-10^{-3}$ cm/sec	2
mittel	$k = 10^{-3}-10^{-4}$ cm/sec	3
klein	$k = 10^{-4}-10^{-5}$ cm/sec	4
sehr klein	$k > 10^{-5}$ cm/sec	5

Vierte Stelle: Form: Kleinbuchstaben

Schmaler langgezogener Strang in der		Delta	k
Talsole	a	Strandebene	l
Breite Fläche	b	Dünenwälle	m
Seitlich der Talsole gelegenes,		Schichtpaket horizontal	o
lokales Vorkommen	c	isoklinal geneigt	p
Tafelberg, isoliertes Erosionsrelikt	d	saiger	q
Bachschuttkegel	e	Antiklinalstruktur	r
Gehängeschutthalde	f	Synklinalstruktur	s
Bergsturzlagerung	g	Verschuppung, enge Verfaltung	t
Decke aus Rutsch- und Sackungsschutt	h	Stock, Massiv	u
Moränendecke	i	Bruchzone	v

Die Form eines Grundwasserleiters in einer Chiffre zu erfassen, ist wegen ihrer Mannigfaltigkeit recht schwer. Es wäre vielleicht prüfenswert, ob zusätzlich die Grösse der flächenhaften Ausdehnung durch eine Zahl vor dem Kleinbuchstaben, die Mächtigkeit durch eine Zahl hinter dem Buchstaben dargestellt werden sollte, um damit die vom betreffenden Grundwasserleiter beanspruchte Kubatur ebenfalls auszudrücken. Um die Chiffrierung dieser zweifellos schwierigsten Stelle nicht noch mehr zu belasten, sei hier vorderhand darauf verzichtet.

Zweite Gruppe: Neubildung

Fünfte Stelle: Art der Neubildung: Grossbuchstaben

Durch Niederschläge	N
Durch Flussinfiltration	I
Durch Meeresinfiltration	S
Unterirdische Übertritte	U
Fossile Vorkommen	F

Sechste Stelle: Intensität der Neubildung: Zahl, der Grundwasserspende q entsprechend, vgl. Tabelle 2, Seite 400

sehr gross	$> 15 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$	1
gross	$10\text{--}15 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$	2
mittel	$5\text{--}10 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$	3
klein	$1\text{--}5 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$	4
sehr klein	$< 1 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$	5

Dritte Gruppe: Physikalische Kriterien

Siebente Stelle: Druckverhältnisse: Grossbuchstaben

Sickerwasser	A
Schichtwasser ungespannt	B
Grundwasser s. str. ungespannt	C
Grundwasser subartesisch gespannt	D
Grundwasser artesisch gespannt	E

Achte Stelle: Druckschwankungen: Kleinbuchstaben

Mit Tagesperiode	d
Mit Jahresperiode	y
Aperiodische Schwankungen	a
Sinkender Trend	l
Steigender Trend	r

Neunte Stelle: Beziehungen zur Vorflut: Zahlen

Indirekte Verbindung (gemäss Fig. 10)	1
Direkte Verbindung (gemäss Fig. 10)	2
Bedeckte Verbindung (gemäss Fig. 10)	3

Vierte Gruppe: Chemische Kriterien

Zehnte Stelle: Gesamtkonzentration: Grossbuchstaben

sehr weich	0 –	1,4 mval	A
weich	1,4–	2,9 mval	B
mittelhart	2,9–	4,3 mval	C
ziemlich hart	4,3–	6,4 mval	D
hart	6,4–	10,7 mval	E
sehr hart	10,7–	17 mval	F
Brackwasser	17 –	170 mval	G
Salzwasser	170 –	1700 mval	H
Sole	> 1700	mval	I

Elfte Stelle: Hauptkomponenten: Chemische Symbole, gemäss Benennung nach mval %. Zwischen den einzelnen Symbolen werden Horizontalstriche gesetzt.

Zwölfte Stelle: Sauerstoffgehalt: Kleinbuchstaben

«normaler» Chemismus	n
«reduzierter» Chemismus	r

Dreizehnte Stelle: Charakteristische Nebenkomponten: Chemische Symbole in der Reihenfolge Kationen, Anionen, gelöste Gase. Treten solche nicht auf, wird ein x geschrieben.

Mit Ausnahme der vierten Stelle (Form des Grundwasserleiters) und der zehnten Stelle (Gesamtkonzentration) können die vorgeschlagenen Chiffrebezeichnungen jeder Stelle noch nach Wunsch vermehrt, ergänzt oder unter sich kombiniert werden.

Gemäss diesem Vorschlag würde der auf Seite 419 beschriebene und auf Figur 13a dargestellte «Typus Ircchel» folgende Chiffre tragen:

P, c, 2, d / N, 3 / B, a + y, 1 / D, Ca–Mg–HCO₃, n, x.

Besteht der Tafelberg statt aus einem Kalkschotter aus einer Kalkplatte «Typus Geissberg», gemäss Figur 13b, so verändert sich einzig die Stelle 1, wo statt P nun K steht, und die Stelle 11, wo das Mg wegfällt; die übrigen Zahlen bleiben die gleichen.

K, c, 2, d / N, 3 / B, a + y, 1 / D, Ca–HCO₃, n, x.

Bei einem Tafelberg aus Quarzitschotter «Typus Taunus» gemäss Figur 13c verändern sich die Stellen 2 und 10, die andern bleiben unverändert, so dass dann die Chiffre heisst:

P, q, 2, d / N, 3 / B, a + y, 1 / A, Ca–HCO₃, n, (CO₂).

Bei einer Basaltplatte «Typus Vogelsberg», Figur 13d, könnte die Chiffre schliesslich heissen:

F, a, 4, d / N, 3 / B, a + y, 1 / A, Ca–(Na)–HCO₃, n, SiO₂, (Fe), (CO₂).

Die auf Figur 13 dargestellten, unter sich verwandten Grundwassertypen bei Tafelbergen zeigen also unter gleichem Klima auf den Stellen 4–9 völlig gleiche Chiffren; verändert werden nur die Stellen 1 und evtl. 3 bei verschiedener Zirkulationsart und Durchlässigkeit, oder aber die Stellen 2 und 10–13 bei verschiedenem Chemismus des Grundwasserleiters und damit auch der Quellen.

Die Art der engen Verwandtschaft der verschiedenen Typen, aber auch ihre charakteristischen Unterschiede kommen somit in der Chiffrierung klar zum Ausdruck.

VI. ANTHROPOGENE EINGRIFFE

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich ausschliesslich auf natürliche, vom Menschen nicht beeinflusste Grundwasservorkommen. Im folgenden sollen nun aber auch noch die anthropogenen Beeinflussungen in Kürze erwähnt werden.

A. Eingriffe in den Grundwasserleiter

1. Verringerung der Durchlässigkeit

Durch Zement- oder Tongel-Injektionen schliesst man Poren und Klüfte, oder durch Vibration verdichtet man das Korngefüge in Lockergesteinen und verringert damit das Porenvolumen. Das bedeutet in beiden Fällen eine künstliche Verringerung der ursprünglichen Durchlässigkeit des Grundwasserleiters an ganz bestimmten, vom Menschen ausgesuchten Stellen.

2. Verringerung des Volumens

Durch Kiesabbau unter den Grundwasserspiegel, durch Zement-Injektionen in den Grundwasserleiter,

- durch Einbauten ins Grundwasser, z. B. bei Gebäuden mit tiefen Kellergeschossen,
- durch Wände, die Teile des Grundwasserleiters von der Umgebung abtrennen,
- durch wasserdichte Tröge oder Tunnels von Verkehrsbauten unter dem Grundwasserspiegel verringert man das Volumen des Grundwasservorkommens. Eine Veränderung des Grundwassertyps findet dadurch jedoch nicht statt.

B. Beeinflussung der Neubildung

1. Verringerung der Grundwasser-Neubildung

Die natürliche Neubildung von Grundwasser wird durch die folgenden Eingriffe des Menschen verringert:

a) Durch Überbauung der durchlässigen Oberfläche, von der aus dank der Versickerung der Niederschläge das Grundwasservorkommen bisher gespeist wurde.

b) Durch Behinderung der Infiltration von Fluss- und Bachwasser, wenn bei Bachkorrekturen die Bette dicht verbaut, bei Flussbauten die Ufer mit einem undurchlässigen Uferschutz versehen oder wenn bisher durchlässige Uferböschungen durch undurchlässige Mauern ersetzt werden. Eine ähnliche Wirkung kommt zustande, wenn durch Verminderung der Fliessgeschwindigkeit oberhalb eines Wehres oder durch Zunahme der künstlichen Verschmutzung bisher durchlässige Flussbette durch Schlammablagerungen abgedichtet werden.

Eine Reduktion der Neubildung hat ein Absinken des Grundwasserspiegels und eine Verminderung der Durchflussmenge und der Feldergiebigkeit, zahlenmässig erfasst als «Grundwasserspende», zur Folge.

2. Verstärkung der Grundwasser-Neubildung

a) Die künstliche Grundwasseranreicherung mittels Versickerungsbecken und -gräben, mittels Versickerungs- und Schluckbrunnen oder anderer Methoden bedeuten eine gezielte Verstärkung der Neubildung, selbstverständlich im Hinblick auf eine verstärkte Nutzung des Grundwassers.

b) Die Bewässerung eines Grundwassergebietes führt fast stets zu einer mehr oder weniger unfreiwilligen Grundwasseranreicherung dank der Versickerung überschüssigen Bewässerungswassers in den Untergrund.

c) Der Aufstau von Oberflächengewässern, wie er praktisch bei jedem Flusskraftwerk erfolgt, bewirkt im Oberwasser eine verstärkte Infiltrationstendenz ins Grundwasser und führt zu einer verstärkten Grundwasserneubildung durch Flussinfiltration, wenn diese Wirkung nicht bewusst durch Abdichtung der Ufer oder durch Entwässerungen kompensiert wird.

d) Findet längs Flussufern mit Infiltrationstendenz eine Grundwasserentnahme statt, so kann durch den Senkungstrichter der Grundwasserfassungen das Druckgefälle zwischen infiltrierendem Fluss und genutztem Grundwasser wesentlich erhöht werden, wodurch das Ausmass der Infiltration künstlich vergrößert werden kann.

e) Wird an Meeresküsten Süsswasser entnommen, so kann das zu einer künstlichen Infiltration von Meerwasser führen. Dadurch wird das genutzte Süsswasser in höchst unerwünschter Weise durch Salzwasser ersetzt, sofern kein ausreichender Ersatz von Süsswasser, sei es natürlich oder durch künstliche Anreicherung, von der Landseite her erfolgt.

C. Hydrologische Eingriffe

1. Veränderung des piezometrischen Niveaus

- a) Die natürliche Druckspannung wird örtlich erniedrigt
- durch künstliche Wasserentnahmen bei Wasserfassungen oder Wasserhaltungen in Baugruben,
 - durch Entwässerungen und Drainagen oder
 - durch künstliche Vertiefung der Vorflut (z.B. im Unterwasser von Flusskraftwerken).

Bei landwirtschaftlichen Drainagen handelt es sich dabei meist nur um Dezimeter, bei Brunnen um Meter, im Bergbau um Dutzende bis Hunderte von Metern. Dabei können unfreiwillig artesischen Brunnen in subartesischen, gespanntes Grundwasser in ungespanntes verändert werden.

Durch unterläufigen Grundwasserentzug aus einem tieferen Stockwerk kann dieses, falls es im natürlichen Zustand hyperpiezometrische Druckverhältnisse aufwies, künstlich in den hypopiezometrischen Zustand übergeführt werden.

- b) Andererseits kann eine Erhöhung des Grundwasserdruckes stattfinden
- beim Abdichten eines natürlichen Auslaufes oder durch Einbauten im Grundwasser, wenn dabei ein künstlicher Rückstau entsteht,
 - oder durch Aufstau des Vorfluters, z.B. bei Flusskraftwerken,
 - oder bei einer verstärkten Neubildung infolge künstlicher Grundwasseranreicherung.

In bedeckten Grundwasserleitern kann dabei früher ungespanntes Grundwasser gespannt werden, subartesische Brunnen können artesisch werden.

2. Veränderung der Druckschwankungen

a) Eine Dämpfung der natürlichen Spiegelschwankungen im Grundwasser findet statt, wenn schwankungserzeugende Vorfluter abgedichtet werden, z. B. durch Einbau von Dichtungswänden parallel den Ufern von Flüssen mit starken Spiegelschwankungen. Eine ähnliche Wirkung haben Drainagen, welche Hochwasserspitzen brechen. Werden Flüsse, die mit dem Grundwasser direkt in Verbindung stehen, eingestaut, so dass deren natürliche Schwankungen wegfallen, so werden zwangsläufig auch die Schwankungen des benachbarten Grundwassers ausgeglichen.

b) Eine Verstärkung der Spiegelschwankungen kann durch zeitweise Übernutzung verursacht werden, wodurch vorübergehend, nämlich bis zur Erneuerung, eine tiefe periodische oder aperiodische Absenkung erfolgt. Findet jedoch keine entsprechende Neubildung statt, dann führt die Übernutzung zum sinkenden Trend, ein weltweites Symptom übernutzter Grundwasservorkommen.

Die Bewirtschaftung künstlicher Stauräume, bei Jahresspeichern mit Jahresperiode und einer Amplitude von Dutzenden bis Hunderten von Metern, bei Tagesspeichern mit Tagesperiode und meist bescheidener Amplitude, führt in den angrenzenden Grundwasservorkommen zu künstlich induzierten analogen Spiegelschwankungen mit deutlicher Verzögerung und Dämpfung der Amplitude landeinwärts. Bei raschen Spiegelschwankungen im Stauraum, z. B. bei Tagesspeichern, kann auch eine periodische Umkehr der Strömungsrichtung im angrenzenden Grundwasser eintreten, alles Erscheinungen, die dem natürlichen Grundwasserregime dort früher fremd waren.

D. Beeinflussung des Chemismus

Alle bisher beschriebenen anthropogenen Eingriffe können zwangsläufig auch einen gewissen Einfluss auf den Chemismus des Grundwassers haben. Wo der Chemismus des Grundwassers nur durch die mineralogische Zusammensetzung des Grundwasserleiters bedingt ist, bleibt die chemische Wirkung eines künstlichen Eingriffes allerdings meist bescheiden und führt kaum zu einer Änderung des Grundwassertyps. Schwerwiegender sind alle jene Fälle, wo künstliche Eingriffe chemische Veränderungen im Grundwasser erzeugen, die nicht mit dem natürlichen Grundwasserleiter zusammenhängen.

1. Künstliche Veränderung des Sauerstoffgehaltes

Wo der Sauerstoffgehalt des Grundwassers künstlich bedeutend verringert wird, kann der sonst «normale» Grundwassertyp in den «reduzierten» übergehen, mit all seinen sekundären chemischen Erscheinungen als Folge des Sauerstoffmangels. Eine solche Umstellung ist besonders dort leicht möglich, wo sich schon im natürlichen Zustand der «normale» Chemismus in einem labilen Gleichgewicht befindet. Anlass zu solcher künstlicher Sauerstoffreduktion können sein:

- a) künstliche Versickerung von häuslichem oder industriellem Abwasser.
- b) Infiltration aus dem Stauraum eines organisch stark belasteten aufgestauten Flusses.
- c) Ablagerung organischer Abfälle im Grundwasser (z. B. als Auffüllungen von Baggerseen).
- d) Künstliche Erhöhung der Grundwassertemperatur.

2. Künstliche Erhöhung der Mineralisation

Wo anthropogene Abfälle irgendwelcher Art im oder über Grundwasser gelagert werden, werden diese stets entweder direkt durch das Grundwasser oder aber durch Niederschläge und Sickerwasser ausgelaugt. Die Auslaugungsprodukte erhöhen dann unweigerlich die Konzentration der gelösten Stoffe im Grundwasser. Werden Industrieabfälle gar in flüssiger Form direkt dem Untergrund übergeben, z. B. als Kali-Endlaugen, entsteht dort ein chemisch völlig veränderter neuer Grundwassertyp. Die Düngung mit Natur- und Kunstdünger verursacht seit Jahrzehnten einen zunehmenden Stickstoffgehalt der Grundwässer in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten.

3. Künstliche «Verbesserung» des Chemismus

Durch künstliche Grundwasseranreicherung mit einwandfreiem Rohwasser kann der Chemismus eines vorher nicht einwandfreien Grundwassers verbessert werden, sei es durch Erhöhung des Sauerstoffgehaltes oder durch Erniedrigung der Mineralisation. Der wasserwirtschaftlich wohl wichtigste Fall dieser Art ist die Verdrängung des Salzwassers durch künstlich angereichertes Süßwasser längs Küsten.

4. Künstliche Durchmischung

Eine seitliche Zonierung quer zur Strömungsrichtung oder eine vertikale Schichtung in der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers kann durch die Entnahme von Grundwasser aus Brunnen im Bereich des Senkungstrichters gestört, in der nächsten Umgebung des Brunnens infolge Durchmischung sogar völlig zerstört werden. Das gepumpte Wasser stellt dann ein unter Umständen chemisch atypisches Mischwasser dar.

*

Alle diese anthropogenen Elemente gehören auch zu einer vollständigen Klassifikation der Grundwasservorkommen und sind in der Nomenklatur zu berücksichtigen.

Viele dieser menschlichen Eingriffe sind nur vorübergehender Natur und könnten technisch jederzeit wieder aufgehoben werden, z. B. die Wirkung einer intensiven Grundwasserabsenkung mittels Pumpen. Andere sind irreversibel und können, einmal ausgeführt, nie mehr rückgängig gemacht werden, z. B. die Verringerung der Durchlässigkeit mittels Injektionen.

VII. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Eine systematische Klassifikation von Grundwasservorkommen begegnet Schwierigkeiten verschiedener Art.

Die grosse Zahl von Parametern, die für eine Klassifikation von Bedeutung sein können, aber es nicht in jedem Fall zu sein brauchen, lässt die Bildung einer fast unbegrenzten Zahl von Kombinationen zu. Erst das Vorhandensein von Korrelationen verringert glücklicherweise die theoretisch denkbaren Kombinationsmöglichkeiten auf ein erträgliches und eher überblickbares Mass und ermöglicht es, mehrere ähnliche Untertypen zu Haupttypen zusammenzufassen und solche schliesslich auch kartographisch auf hydrogeologischen Karten darzustellen.

Die den Grundwasserleiter charakterisierenden geologischen Kriterien dürfen – für menschliche Zeitmaßstäbe – als konstant angenommen werden. Die meteorologischen, physikalischen und chemischen Kriterien sind dagegen in Funktion der Zeit nicht konstant, sondern zeigen periodische oder aperiodische Schwankungen, die bei grösseren Amplituden die Klassifikation nennenswert erschweren können.

Der Mensch als «geologischer Faktor» greift in zunehmendem Masse in die natürlichen Verhältnisse ein, sei es nur vorübergehend, sei es durch bleibende und irreversible Massnahmen, was als künstliche Eingriffe bei einer Klassifikation und einer systematischen Nomenklatur mitberücksichtigt werden sollte.

Zudem ist die hydrogeologische Terminologie auf vielen Gebieten heute noch eigentümlich unpräzise. Nicht nur die Übertragung in andere Sprachen, in denen unter Umständen gewisse Fachausdrücke in anderem Sinne verwendet werden oder ganz einfach fehlen, bietet Schwierigkeiten. Auch im eigenen Sprachbereich fehlen häufig klar verständliche und sprachlich korrekte Substantive, Adjektive und Verben mit exakt definiertem hydrogeologischem Inhalt. Die von J. Margat seit 1964 mit vorbildlicher Vollständigkeit veröffentlichte «Terminologie hydrogéologique, propositions pour un dictionnaire» verdiente auch in anderen Sprachen Nachahmung. Die konsequentere Anwendung der «Fachausdrücke und Begriffserklärungen» der deutschen DIN-Normen könnte manche sprachlich bedingten Missverständnisse vermeiden helfen; die Ergänzung jener Listen ist eine ständige Aufgabe aller Fachleute.

Schliesslich steckt die eigentliche systematische Gliederung der Grundwassertypen noch durchaus in den Anfängen. Die vorliegende Studie wollte Möglichkeiten und Wege aufzeigen und dazu anregen, Grundwasservorkommen nicht allzu deskriptiv zu behandeln, sondern auch in ihrer systematischen Stellung, in ihrer Abhängigkeit von den verschiedensten Kriterien und in ihrem Gemeinsamen und ihrem Unterschiedlichen zu anderen Vorkommen zu würdigen.

LITERATURVERZEICHNIS

- AMBROGGI, R. et al. (1960): *Observations générales sur l'invasion des eaux marines dans les nappes d'eau souterraines et dans les régions d'estuaires le long des cotes du Maroc*. I.A.S.H. 52.
- BACK, W. (1960): *Origin of Hydrochemical Facies of Groundwater in the Atlantic Coastal Plain*. Int. Geol. Congress Copenhagen I.
- BECKSMANN, E. (1955): *Grundwasserchemismus und Speichergestein*. Z. dtsch. Geol. Ges. 106.
- BITTERLI, P. (1945): *Lithologisch-hydrographische Karte des Blauengebietes 1:25000*. Beitr. Geol. K. Schweiz, N.F. 81, Tafel 3.

- BREDDIN, H. (1963): *Die Grundrisskarten des Hydrogeologischen Kartenwerkes Nordrhein-Westfalen*. Geol. Mitt. 2/4.
- BURDON, D., and PAPAKIS, N. (1962): *Handbook of Karst Hydrology*, Inst. for Subsurface Research, Athens, Greece.
- Bureau de recherches géologiques et minières (1963): *Carte Hydrogéologique de la France 1:50000, Feuille Douai*.
- BURGER, A. (1959): *Hydrogéologie du Bassin de l'Areuse*. Diss. Univ. Neuchâtel.
- CADISCH, J. (1932): *Zur Geologie der Schweizer Mineral- und Thermalquellen*. Verh. natf. Ges. Basel 42.
- (1936): *Karte der Mineralquellen der Schweiz und ihrer Nachbargebiete, 1:1000000*. Mitt. aus dem Gebiet der Lebensmitteluntersuch. u. Hygiene, Eidg. Gesundheitsamt 27.
- (1956): *Über die Wiedererbohrung der Therme von Zurzach (Kt. Aargau)*. Eclogae geol. Helv. 49/2.
- (1959): *Geologische Ergebnisse der Mineralquellenbohrung Eglisau*. II. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing. 26/70.
- CALEMBERT, L., et MONJOLIE, A. (1968): *Etude hydrogéologique d'un massif cambrien intensément fracturé (Coo, Belgique)*. Mém. I.A.H., Congress of Istanbul, 1967.
- CASTANY, G. (1967): *Traité pratique des eaux souterraines* (Ed. Dunod, Paris).
- CORNET, A., et ROGNON, PH. (1967): *Estimation de la Valeur des débits circulant dans la nappe du Continental Intercalaire au Sahara sud-algérien*. Chronique d'Hydrogéologie No 11, B.R.G.M.
- CUSHMAN, R. V. (1968): *Recent Developments in Hydrogeologic Investigations in the Karst Area of Central Kentucky*. Mém. I.A.H. VIII, Congress of Istanbul, 1968.
- DIELER, H. (1960): *Über die Normung von Karten zur Darstellung der Grundwasserbeschaffenheit*. Deutsche Gewässerkundl. Mitt. 4/2, Koblenz.
- DIELER, H., und DIESEL, E. (1964): *Die Grundwasserbeschaffenheit im Rheintal zwischen Bonn und Düsseldorf*. Geol. Mitt. 3, Aachen.
- ENGELHARDT, W. VON (1960): *Der Porenraum der Sedimente* (Springer Verlag, Berlin).
- FAST, H., und SAUER, K. (1958): *Die chemische Zusammensetzung südbadischer Grundwässer; Herkunftsfragen und Versuch einer Typologie*. «Vom Wasser» 25.
- FRESENIUS, W. (1956): *Chemische Nomenklatur der Mineralquellen*. Z. deutsch. Geol. Ges. 106.
- FRICKE, K. (1954): *Eine chemisch-geologische Karte der Mineralquellen Nordrhein-Westfalens*. Geol. Jb. 69.
- FURTAK, H., und LANGGUTH, H. R. (1965): *Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen*. Mém. I.A.H. VII, Kongress in Hannover, 1965.
- GERB, L. (1956): *Erläuterungen zu Blatt Regensburg der Hydrogeologischen Übersichtskarte 1:500000*.
- (1958): *Grundwassertypen*. «Vom Wasser» 25.
- GRAHMANN, R. (1958): *Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung*. Forschungen zur deutschen Landeskunde 104.
- GÜBELI, O. (1948): *Chemische Untersuchung von Mineralwässern* (Univ. Verlag, Innsbruck).
- HARRASSOWITZ, H. (1944): *Wasseranalysen*. Z. f. prakt. Geol. 52.
- HEM, J. D. (1959): *Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water*. Geol. Survey, Water-Supply 1473, Washington.
- HERZBERG, B. (1901): *Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder*. Journ. G. u. W., München.
- HUG, J. (1918): *Die Grundwasservorkommnisse der Schweiz*. Ann. der Schweiz. Landeshydrographie 3.
- HUG, J., und BEILICK, A. (1934): *Die Grundwasserverhältnisse des Kantons Zürich*. Beitr. Geol. der Schweiz, Geotechn. Serie, Hydrologie 1.
- JÄCKLI, H. (1964): *Die Grundwassertypen des aargauischen Reusstales. Mit Grundwasserkarte 1:100000*. «Wasser- und Energiewirtschaft», Nr. 12.
- (1965): *Der Begriff der «Grundwasser-Höflichkeit»*. Eclogae geol. Helv. 58/1.
- (1967): *Beziehungen zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser bei Flusskraftwerken*. Mém. I.A.H. VII, Kongress von Hannover, 1965.
- (1968): *Die Grundwasservorkommen des Kantons Aargau*. «Wasser- und Energiewirtschaft» (Baden), Nr. 9/10.
- JONG DE, J. (1960): *The Course of the Desalinisation of the Groundwater after the February 1953 Flooding by Seawater of the 'Oranjezon' Dune Area, Isle of Walcheren, Netherlands*. I.A.S.H. 52.
- JOUKOWSKY, E. (1941): *Géologie et eaux souterraines du pays de Genève*. Genève.
- KEILHACK, K. (1935): *Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde*, Berlin.

- KEPINSKI, A. (1968): *Classification of Water-bearing Strata Based on Conditions of Flow of Water into Wells*. Felsmechanik und Ingenieurgeologie VI/3.
- KOEHNE, W. (1948): *Grundwasserkunde*, Stuttgart, Verlag Naeglele.
- KREJCI-GRAF, K. (1963): *Über rumänische Ölfeldwässer*. Geol. Mitt. 2/4, Aachen.
- LANGGUTH, H. (1966): *Die Grundwasserverhältnisse im Bereich des Velberter Sattels*, Düsseldorf.
- LAUVERJAT, J. (1967): *Hydrogéologie de l'Albien dans le centre du bassin de Paris*. Chronique d'Hydrogéologie 11, B.R.G.M.
- (1967): *Historique des forage artésiens dans le bassin de Paris*. Chronique d'Hydrogéologie 11, B.R.G.M.
- LEMCKE, K., und TUNN, W. (1956): *Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage*. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing. 23/64.
- LEMCKE, K., BÜCHI, U. P., und WIENER, G. (1968): *Einige Ergebnisse der Erdölexploration auf die mittelländische Molasse der Zentralschweiz*. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing. 35/87.
- MC LAUGHLIN, T. G. (1968): *Exploitation of Ground Water in a Semiarid Basin*. Mém. I.A.H., Congress of Istanbul, 1967.
- LÖHNERT, E. (1967): *Die Grundwassertypen tieferer Stockwerke in Hamburg*, N. Jb. Geol. Paläont. Abh. 129/2.
- LÜTSCHG, O., BOHNER, R., und DIETZ, W. (1944): *Zur Hydrologie der Landschaft Davos*. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Hydrologie, 4. Lief., II. Bd., III. Teil, Zürich 1944.
- MARGAT, J. (1964): *Terminologie hydrogéologique*. Chronique d'Hydrogéologie 5, B.R.G.M. Paris.
- (1966): *La cartographie hydrogéologique*. Chronique d'Hydrogéologie 9, B.R.G.M. Paris.
- MATTHESS, G., und THEWS, J.-D. (1963): *Erläuterungen zur geolog. Karte von Hessen 1:25000, Blatt Queck*, Wiesbaden.
- MAURIN, V., and ZOETL, J. (1965): *Salt Water Encroachment in the Low Altitude Karst Water Horizons of the Island of Kephallinia*. I.A.S.H., Symposium of Dubrovnik, 1965.
- MICHEL, G. (1963): *Untersuchungen über die Tiefenlage der Grenze Süsswasser–Salzwasser im nördlichen Rheinland und anschliessenden Teilen Westfalens, zugleich ein Beitrag zur Hydrogeologie und Chemie des tiefen Grundwassers*. Forschungsber. des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1239, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen.
- MORNOD, L. (1948): *Une nappe d'eau souterraine à Vuadens (Gruyère)*. Géologie, hydrologie et captage. Bull. Soc. Frib. sci. nat. 38, 1944/47.
- NÖRING, F. (1950): *Fragen der Grundwasserchemie in Beziehung zu Oberfläche und Untergrund*. Z. deutsch. geol. Ges. 102/1.
- POZZI, R., und FRANCANI, V. (1968): *Lineamenti idrogeologici della pianura di Alessandria*. «Geologia tecnica» 1968/4.
- PRINZ, E. (1923): *Handbuch der Hydrologie*. 2. A., Berlin.
- RUTSCH, R. (1952): *Geologische Probleme der Erschliessung unterirdischer Wasservorkommen*. Monatsbull. Schweiz. Ver. Gas- und Wasserf. 5/1952.
- RUTSCH, R., SCHWAB, W., und THALMANN, H. (1969): *Zur Karsthydrogeologie im südlichen Berner Jura*. Eclogae geol. Helv. 62/1.
- SCHMASSMANN, W. und H.-J. (1946): *Hydrochemische Methoden bei der Erforschung von Grundwasservorkommen*. Eclogae geol. Helv. 39.
- SCHMASSMANN, H., SCHMASSMANN, W., und WYLEMANN, E. (1950): *Die Oberflächengewässer, Grundwasservorkommen und Abwässer des unteren Birstales*. Tätigkeitsber. d. Natf. Ges. Baselland 18.
- SCHNEIDER, H. (1964): *Geohydrologie Nordwestfalens* (Verlag Rudolf Schmidt, Berlin).
- SCHNEIDER, H., und THIELE, S. (1965): *Geohydrologie des Erftgebietes*. Ministerium f. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen.
- SCHOELLER, H. (1962): *Les eaux souterraines* (Masson & Cie, Paris).
- Schweiz. Verein analyt. Chemiker (1937): *Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz* (Verlag Zimmermann & Cie, Bern).
- STEFFEN, M., und TRÜEB, E. (1964): *Quartärgeologie und Hydrologie des Winterthurer Tales*. Mitt. Naturw. Ges. Winterthur 31.
- TURNER, A. (1967): *Hydrogeologie* (Springer Verlag, Wien).
- TODD, D. K. (1959): *Ground Water Hydrology*, New York, London.
- TOLMAN, C. F. (1937): *Ground Water*, New York, London.

- UDLUFT, H. (1957): *Zur graphischen Darstellung von Mineralwasseranalysen und von Wasseranalysen. Heilbad und Kurort 1957/10*, Gütersloh.
- VAN EVERDINGEN (1962): *The Deeper Ground Water in Libya*. I.A.S.H. VII/3.
- VENDEL, M., und KISHAZI, P. (1963): *Beziehungen zwischen Karstwässern und Thermen auf Grund der beobachteten Verhältnisse im Transdanubischen Mittelgebirge*. Mitt. Geol. Ges. Wien 55.
- WEBER, J. (1922): *Die Wasserverhältnisse von Winterthur und Umgebung mit besonderer Berücksichtigung des Grundwassers*. Bull. Schweiz. Ver. Gas- und Wasserf.

Manuskript eingegangen am 9. Februar 1970.