

## Hydrochemische Untersuchungen an Grund- und Oberflächenwässern im Einzugsgebiet der Fränkischen Saale

VON N. GEORGOTAS (München)

*Kurzfassung:* Hydrochemische Untersuchungen an mineralarmen Grund- und Oberflächenwässern im Einzugsgebiet der Fränkischen Saale (Unterfranken) hatten zum Ziel, die im Gebiet auftretenden Wässer zu beschreiben, zu typisieren und aufgrund ihrer chemischen Beschaffenheit den entsprechenden Gesteinen zuzuordnen. Es wurden dabei drei Gruppen unterschieden: *Wässer des Buntsandsteins*, *Muschelkalkwässer* und *Mischwässer* aus Buntsandstein und Muschelkalk. Der Typisierung der Wässer wurden hydrochemische Gesichtspunkte zugrunde gelegt.

Die chemische Beschaffenheit der Grundwässer eines Gebietes ist überwiegend von der petrographischen und geochemischen Ausbildung der durchflossenen Sedimente abhängig. Ferner ist eine Reihe weiterer Faktoren zu nennen, wie z. B. die primärchemische Zusammensetzung des Niederschlagswassers, der Zutritt von Grundwässern anderer chemischer Zusammensetzungen aus benachbarten Gebieten (allochthone Wässer), sowie anthropogene Beeinflussungen, die den Chemismus dieser Wässer prägen.

Im Einzugsgebiet der Fränkischen Saale wurden in den Jahren 1970—1972 insgesamt 140 Wasserproben aus Quellen, Brunnen und Oberflächenwässern entnommen und auf ihren Gehalt an gelösten Mineralstoffen untersucht. Um die jahreszeitlichen Schwankungen im Chemismus der Wässer feststellen zu können, wurden die meisten dieser Proben zweimal innerhalb eines Jahres in Abständen von 5 bis 6 Monaten (Frühjahr und Herbst) analysiert. Die Analysen umfaßten neben der Messung von Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, die Bestimmung des Abdampfdruckstandes, der freien und aggressiven Kohlensäure, sowie die Kationen  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  und der Anionen  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ .

Die Ergebnisse der Wasseranalysen wurden auf Tafel I (im Anhang) kartenmäßig dargestellt.

Im folgenden sollen die Wässer dieses Bereiches nach ihrer geologischen Herkunft in drei Gruppen gegliedert werden.

- Wässer des Buntsandsteins
- Muschelkalkwässer und
- Mischwässer aus Buntsandstein und Muschelkalk.

# 1. Wässer aus dem Buntsandstein

Die im Ausbreitungsgebiet des Buntsandsteins auftretenden Grundwässer werden nicht weiter untergliedert, da sie wegen Fehlens von abdichtenden Schichten zwischen den im Gebiet vorkommender Sandstein-Folgen Mischwässer darstellen. Nur im nordwestlichen Teil des Arbeitsgebietes sind reine Wässer des Mittleren Buntsandsteins anzutreffen, deren Mineralstoffgehalt zwischen 0,5 und 1,1 mval/l schwankt.

Die Konzentration an gelösten Mineralstoffen schwankt zwischen 0,5 und 2,5 mval/l (vgl. Fig. 1).

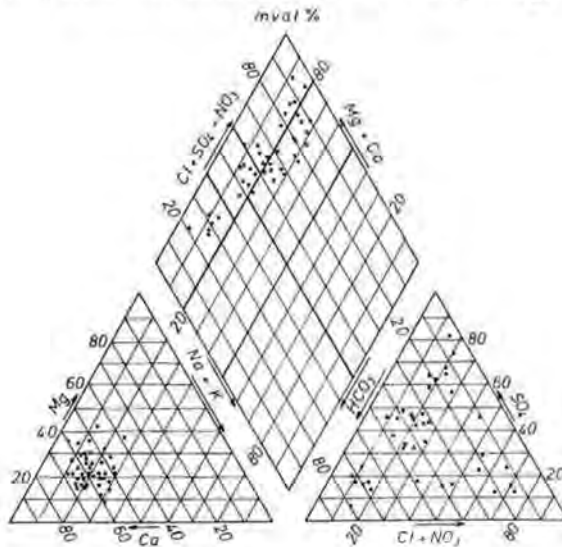
## Kationen

### Natrium und Kalium

Der Natriumgehalt bewegt sich zwischen 2,3 und 8,5 mg/l, Kalium ist mit maximal 4 mg/l vertreten. Soweit keine anthropogene Beeinflussung stattgefunden hat, stammen diese Ionen aus den wasserführenden Gesteinen und ihrer Verwitterungszone.

### Gesamthärte, Calcium und Magnesium

Die Gesamthärte, die durch den Anteil an  $Mg^{2+}$ - und  $Ca^{2+}$ -Ionen bestimmt wird, schwankt zwischen 1,2 und 7<sup>0</sup>dH, demgemäß sind die



Buntsandstein - Wasser

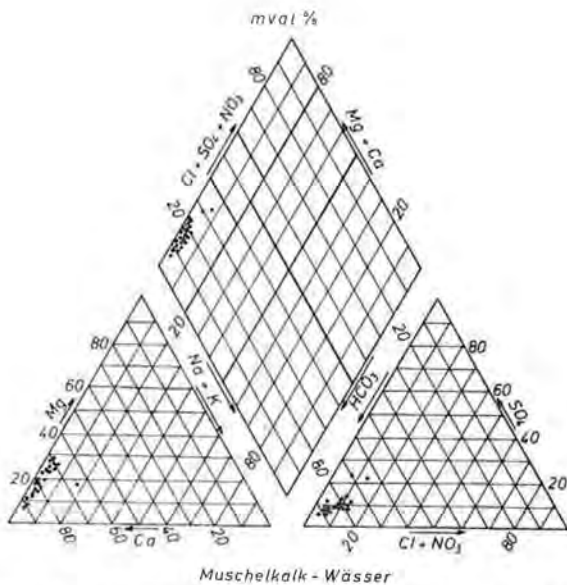
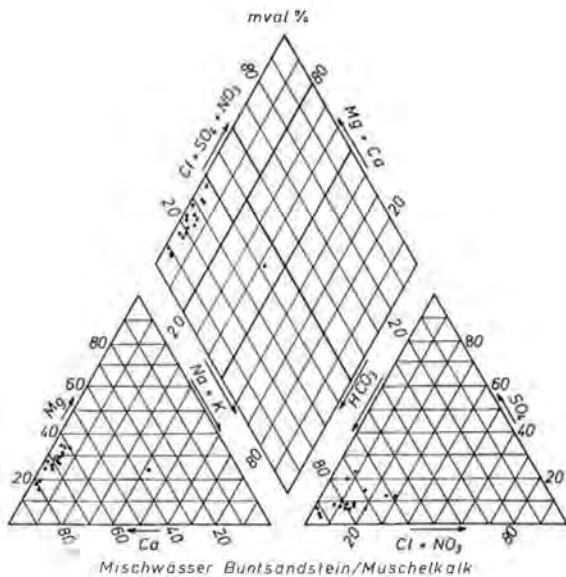


Fig. 1: Chemische Zusammensetzung der Grundwässer des Arbeitsgebietes.

Wässer nach der Härteskala\* in BRIX, HEYD, GERLACH (1963) als sehr weich bis weich zu bezeichnen. Der Gehalt an Magnesiumionen schwankt zwischen 0,8 und 8,0 mg/l; meist liegen die  $Mg^{2+}$ -Werte jedoch bei 2 bis 3 mg/l. Die  $Ca^{2+}$ -Gehalte schwanken von 6,4 bis 27 mg/l. Die Calcium-Magnesium-Verhältnisse in mval streuen zwischen 0,9 und 3,8. In der Mehrzahl der Analysen bewegen sie sich jedoch zwischen 2 und 3,5, und somit sind sie als niedrig anzusehen. Dieses niedrige Calcium-Magnesium-Verhältnis dürfte auf Mg-haltige Glimmer (Biotit) im Speichergestein zurückzuführen sein.

### Gesamteisen

Das Gesamteisen liegt meist in Gehalten von 0,01—0,2 mg/l vor. Die häufigsten Werte bewegen sich jedoch in dem Bereich von 0,04 bis 0,16 mg/l. Die Herkunft des Eisenions ist primär in der eisenhaltigen Verwitterungszone der Buntsandsteinschichten zu suchen, ferner stammt ein Teil aus dem Muttergestein. Durch die Zirkulation im klüftigen Medium des mit aggressiver Kohlensäure reichen Wassers wird Eisen aus den Klüftflächen gelöst, was meist eine Entfärbung der Klüftflächen bewirkt.

## Anionen

### Chlorid und Nitrat

Die **Chloridwerte** liegen in der Größenordnung zwischen 2 und 14 mg/l, bei anthropogenen Einflüssen steigt der Gehalt an Chloriden bis zu 60 mg/l. Die Häufung der Werte liegt zwischen 4 und 8 mg/l und entspricht praktisch dem normalen Chloridgehalt aller natürlichen mineralarmen Wässer des nordbayerischen Raumes.

Die Grundwässer aus den bewaldeten Gebieten des Buntsandsteins weisen im allgemeinen **Nitratgehalte** zwischen 0,4 und 5 mg/l auf. Die Herkunft dieser Nitrate ist meist in den oberen Bodenschichten zu suchen. Sie bilden sich bei der oxidativen bakteriellen Zersetzung stickstoffhaltiger organischer Substanzen im Boden und gelangen mit dem Sickerwasser in das Grundwasser.

Die Grundwässer aus den landwirtschaftlich genutzten Gebieten und aus dem Bereich von Siedlungen weisen höhere Chlorid- und Nitratwerte auf. Die Nitratgehalte liegen hier meist zwischen 30 bis

---

#### \* Härteskala

Härtegrad (°dH)	0— 4 sehr weich	12—18 ziemlich hart
	4— 8 weich	18—30 hart
	8—12 mittelhart	über 30 sehr hart

40 mg/l und können gebietsweise bis über 80 mg/l ansteigen. Diese hohen Nitratwerte werden meist von hohen Chloridgehalten (bis zu 60 mg/l) begleitet. In diesen Gegenden dringen sowohl Chloride als auch Nitrate aus Abwässern und aus organischen und anorganischen Düngemitteln ins Grundwasser ein und tragen damit zu seiner Verunreinigung bei.

### Sulfat

Die Konzentration der Buntsandsteinwässer an Sulfationen liegt zwischen 7 und 50 mg/l. Soweit es sich nicht um anthropogene Einflüsse handelt, dürfte die Herkunft des Sulfats auch auf die oberen Bodenschichten zurückzuführen sein. Nach A. BUCHNER (1) beträgt der Schwefelgehalt der mitteleuropäischen Böden etwa 0,2 bis 0,8 g S pro kg Trockenboden. Dieser Schwefel ist überwiegend organisch an Humussubstanzen gebunden und liegt meist als Sulfid vor. Durch die Einwirkung von Bodenbakterien werden diese Sulfide oxydiert. Die so freiwerdende Schwefelsäure setzt sich dann mit den im Boden vorhandenen Basen in Sulfate um und kann durch Ausspülung der Böden mit dem Sickerwasser in das Grundwasser gelangen.

### Hydrogenkarbonat (Karbonathärte)

Das Hydrogenkarbonat kommt in den Wässern nur in kleinen Gehalten vor. Wegen der Armut an anderen Anionen stellt es jedoch anteilmäßig das am stärksten vertretene Anion dar. Die Wässer enthalten Hydrogenkarbonationen in Konzentrationen meist zwischen 4 und 40 mg/l bzw. 0,07 und 0,7 mval/l (0,2 bis 2<sup>o</sup>dH); nur ein kleiner Teil der untersuchten Proben weist höhere HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Gehalte auf (bis zu 80 mg/l bzw. 1,3 mval/l).

## Der Kohlensäuregehalt der Buntsandsteinwässer

Der Kohlensäuregehalt der mineralarmen Buntsandsteinwässer hängt im wesentlichen von exogenen Vorgängen ab; ein kleiner Teil stammt aus den Niederschlägen, die Hauptmenge der in den Wässern enthaltenen Kohlensäure jedoch gelangt ins Grundwasser durch das Sickerwasser aus der Bodenluftzone, in der eine intensive Kohlendioxidausscheidung aus Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen stattfindet. Sie unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen, die durch den wechselnden Lebensrhythmus im Boden bedingt ist. Wegen des geringen Karbonatgehaltes der Buntsandsteinschichten liegt die freie Kohlensäure in den Wässern mit Werten zwischen 12 und 80 mg/l weitgehend als aggressive Kohlensäure vor.

## Harte Wässer aus dem Buntsandstein (Tiefenwässer)

Im Buntsandsteinbereich treten gebietsweise Wässer auf, die einen höheren Gesamtmineralstoffgehalt aufweisen als die normalen Buntsandsteinwässer. Diese Erhöhung des Gesamtgehaltes an gelösten Stoffen ist überwiegend durch  $\text{Ca}^{2+}$ -,  $\text{Mg}^{2+}$ - und  $\text{HCO}_3^-$ -Ionen bedingt, so daß sie sich als mittelhart (bis 8°dH) erweisen. Unter Ausschluß einer Beeinflussung der Wässer aus dem Muschelkalk sind die Gründe der erhöhten Härten an folgende Faktoren gebunden:

- Die Wasseraustritte hängen unmittelbar mit Störungen zusammen und fördern Wasser aus tieferen Bereichen des Buntsandsteins. Es ist anzunehmen, daß in größeren Tiefen das Gesteinsbindemittel, bestehend aus Sulfaten und Karbonaten, erhalten ist.
- Die Quellen entspringen in Buntsandsteinbereichen, wo dieser mit quartären Sedimenten bedeckt ist (kalkhaltiger Löß). Die  $\text{Ca}^{2+}$ -,  $\text{Mg}^{2+}$ - und  $\text{HCO}_3^-$ -Gehalte dieser Wässer sind im Vergleich zum normalen Buntsandstein-Wasser relativ hoch und können bis zu 3,5 mval/l bzw. 210 mg/l ansteigen.

Aufgrund der chemischen Zusammensetzung lassen sich im Buntsandsteinbereich vier Grundwassertypen im Sinne von H. R. LANGGUTH (5) unterscheiden:

- a) **Normal erdalkalische Wässer; überwiegend hydrogenkarbonatisch.** Hierzu gehören Wässer, die über 60 mval % Hydrogenkarbonat aufweisen (reine Buntsandstein-Wässer).
- b) **Normal erdalkalische Wässer; hydrogenkarbonatisch-sulfatisch.** Beim höheren Mineralstoffgehalt tritt der Hydrogenkarbonatanteil zurück, entsprechend steigt der Sulfatanteil an (Plattensandstein-Wässer).
- c) **Normal erdalkalische Wässer; überwiegend sulfatisch.** Zu dieser Gruppe gehören Wässer, die 60—80 mval % Sulfat aufweisen (Tiefenwässer).
- d) **Erdalkalische Wässer mit erhöhtem Alkalienanteil; überwiegend sulfatisch.** Es handelt sich dabei um Wässer, deren hoher Alkalienanteil auf anthropogene Beeinträchtigungen zurückzuführen ist. Diese Wässer weisen auch hohe Chlorid- und Nitratgehalte auf (20 bis 40 mval %).

## 2. Wässer aus dem Muschelkalk

Im östlichen und südöstlichen Teil des Arbeitsgebietes sind Muschelkalkschichten verbreitet. Hier treten Wässer auf, die höhere Konzentrationen an gelösten Stoffen aufweisen als die Grundwässer aus dem Buntsandsteinbereich. Dieser Anstieg ist auf den hohen Karbonatgehalt des Muschelkalks zurückzuführen und vollzieht sich durch die

lösende Wirkung der Kohlensäure auf Karbonate des Calciums und Magnesiums. Ferner treten Wässer mit hohen Sulfatgehalten im Bereich der Anhydrit-Gruppe auf (Fig. 1).

Die pH-Werte der untersuchten Wasserproben schwanken von 6,8 bis 7,6, sie liegen jedoch meist zwischen 7 und 7,4. Der Mineralstoffgehalt schwankt zwischen 5,1 und 10,1 mval/l, die meisten Werte liegen bei 7,7 bis 8,3 mval/l.

## Kationen

### Natrium und Kalium

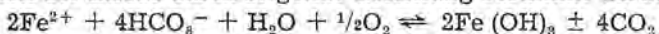
Der Gehalt der Wässer an Natrium und Kalium ist im allgemeinen sehr gering. Die Natriumgehalte schwanken zwischen 2,3 und 4,3 mg/l. Die Kaliumwerte streuen von 1,5 bis 4,0 mg/l. Das Natrium-Kalium-Verhältnis schwankt zwischen 1,8 und 3,7, das Maximum liegt bei 2,3 bis 3,2.

### Gesamthärte, Calcium und Magnesium

Die Muschelkalkwässer weisen durchgehend Härten von über 20°dH auf und sind somit als harte Wässer zu bezeichnen. Das  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -Verhältnis ist unterschiedlich. In Bereichen, wo eine Beeinflussung der Wässer aus den Schichten des mittleren Muschelkalks stattfindet, schwanken die Werte zwischen 2,4 und 3,8; hier wird der Einfluß des Dolomitgehaltes des Mittleren Muschelkalks deutlich. Demgegenüber sind die Verhältnisse in den Wässern aus dem Unteren Muschelkalk durchgehend größer; sie bewegen sich von 4 bis 11.

### Gesamteisen

Das Eisenion kommt in den Muschelkalkwässern meist nur in geringen Mengen vor (0,01—0,05 mg/l). Diese geringen Eisengehalte sind nach L. GERB (8) darauf zurückzuführen, daß bei sauerstoffhaltigen Wässern mit pH-Werten von über 7 und hohen  $\text{HCO}_3^-$ -Gehalten die Löslichkeit des Eisens durch folgende Gleichung bestimmt wird:



Es kann somit bei Sauerstoffsättigung Eisen in gelöster Form nur in Spuren verbleiben.

## Anionen

### Chlorid, Sulfat, Nitrat (Nichtkarbonathärte)

Die Chloridgehalte der Muschelkalkwässer von 7,4—13,5 mg/l entsprechen etwa den Werten der Buntsandsteinwässer. Der Schwankungsbereich der Sulfatkonzentrationen von 24—110 mg/l ist relativ

groß; die hohen Werte sind auf Gips- und Anhydritreste im Mittleren Muschelkalk zurückzuführen. Die meisten Sulfatwerte der vom Mittleren Muschelkalk unbeeinflussten Wässer liegen zwischen 24 und 48 mg/l. Der Gehalt an **Nitrationen** beträgt bei anthropogen nicht beeinflussten Wässern nur 1,0—4,6 mg/l. Die meisten Muschelkalkwässer weisen jedoch viel höhere Nitratgehalte (bis zu 37 mg/l) auf, die aus dem Einfluß der Landwirtschaft und der Besiedelung herrühren.

### **Hydrogenkarbonat (Karbonathärte)**

Das Hydrogenkarbonat stellt das am stärksten vertretene Anion der Muschelkalkwässer dar. Die Hydrogenkarbonatkonzentration der Muschelkalkwässer beträgt meist 5,5—6,9 mval/l (15,3—19,1°dH). Die Gesamthärte besteht somit überwiegend aus Karbonathärte.

### **Der Kohlensäuregehalt der Muschelkalkwässer**

Die Wässer des Muschelkalkbereiches stehen weitgehend im Gleichgewicht. Nur bei 15% der untersuchten Wasserproben wurden geringe Mengen aggressiver Kohlensäure gefunden (2,2—9,7 mg/l). Das fast vollständige Fehlen aggressiver Kohlensäure ist für die Ausbildung der sogenannten Kalkrostschuttschicht von Bedeutung. Diese für die Praxis wichtige Eigenschaft kommt den Wasserversorgungen der Städte Bad Kissingen, Mühnerstadt und Bad Neustadt zugute, die ihr Wasser überwiegend aus den Muschelkalkschichten beziehen.

Die hydrochemische **Typisierung** der Muschelkalkwässer führte zu folgendem Ergebnis:

Bei dem überwiegenden Teil der Proben handelt es sich um **normalerdalkalische Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch**. Ein sehr geringer Anteil der untersuchten Quellen, deren Wässer gips- und anhydrithaltige Schichten durchfließen (Mittlerer Muschelkalk), weisen Sulfatanteile von über 20% auf, sie gehören somit dem Typ der **normal-erdalkalischen Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch-sulfatisch** an.

## **3. Mischwässer Buntsandstein/Muschelkalk**

Bei dieser Gruppe werden im folgenden Wässer unterschieden, die im Buntsandsteinbereich auftreten, ihren Mineralstoffgehalt jedoch hauptsächlich aus den Muschelkalkschichten beziehen. Sie treten überall dort auf, wo im Einzugsgebiet Muschelkalk ansteht. Es handelt sich meist um schwach saure bis schwach alkalische Wässer, deren Gesamtmineralisation sich in den Grenzen von 3,9—6,8 mval/l bewegt und vom Durchmischungsgrad Buntsandstein/Muschelkalk abhängig ist. Aufgrund ihrer verhältnismäßig hohen Härten (10,4—18,5°dH) sind die Wässer als mittelhart bis ziemlich hart anzusprechen. Bei den



Kationen sind **Calcium** und **Magnesium**, deren Verhältnis von 1,8 bis 4,8 schwankt (ähnlich wie in den normalen Muschelkalkwässern), dominierend. Natrium verhält sich zum **Kalium** wie 2,4:1 bis 5,3:1 und liegt in den für Buntsandstein und Muschelkalk üblichen Grenzen. **Eisen** kommt nur in Spuren vor. Bei anthropogenen Einflüssen steigen die **Nitratgehalte** bis zu 25 mg/l an. Parallel dazu nehmen die **Chloride** bis 20 mg/l zu. Die **Sulfatwerte** bewegen sich in den Grenzen von 6,9—34 mg/l, während die Konzentration an **Hydrogenkarbonat**, das bei den Anionen am stärksten vertreten ist (67—93 mval%), auf 350 mg/l ansteigen kann (Fig. 1). Der Gehalt an **aggressiver Kohlensäure** schwankt zwischen 0 und 31 mg/l.

Nach ihrer chemischen Beschaffenheit lassen sich diese Mischwässer durchgehend als **normal-erdalkalische Wässer mit überwiegendem Hydrogenkarbonatgehalt** klassifizieren.

### Vergleichende Betrachtungen zum Chemismus der drei Wassergruppen

Auf Fig. 2 wurden die Hauptionen der einzelnen Wasserproben in Millivalprozent (mval%) mit der Gesamtmineralisation in Beziehung gebracht. Es zeigt sich deutlich, daß auf die **Wässer des Buntsandsteins** im Mittel etwa 20 mval% Alkalien und 30 mval% Chloride + Nitrate entfallen. In den **Mischwässern** ist der Anteil der Alkalien etwa 20 mval%, Chloride und Nitrate sind mit insgesamt 20 mval% beteiligt. Der Lösungsinhalt der harten **Muschelkalkwässer** setzt sich aus 95 mval% Erdalkalien und 90 mval% Sulfaten und Karbonaten zusammen. Die Buntsandsteinwässer weisen im allgemeinen sowohl mval%-mäßig als auch absolut höhere Werte an  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  gegenüber den Muschelkalkwässern auf. Die primäre Herkunft dieser Ionen ist in die Buntsandsteinschichten und ihrer Verwitterungszone zu suchen, die gegenüber den Muschelkalkschichten einen höheren Anteil an Alkalimineralien enthalten (Alkalifeldspäte). Des weiteren nehmen die nicht im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht stehenden (aggressiven) Buntsandsteinwässer aufgrund ihres relativ hohen Gehaltes an freier überschüssiger Kohlensäure aus den durchflossenen Sedimenten mehr Alkalien auf als die Gleichgewichtswässer der Muschelkalkschichten.

Der Erdalkaligehalt der Muschelkalkwässer ist weitgehend einheitlich. Es treten jedoch geringfügige Schwankungen auf, die vor allem die Magnesiumwerte betreffen und auf den unterschiedlichen Magnesiumgehalt der Muschelkalkschichten zurückzuführen sind (Mittlerer Muschelkalk). Dies spiegelt sich auch in das Calcium-Magnesium-Verhältnis der Muschelkalkwässer wider. Im Gegensatz hierzu sind

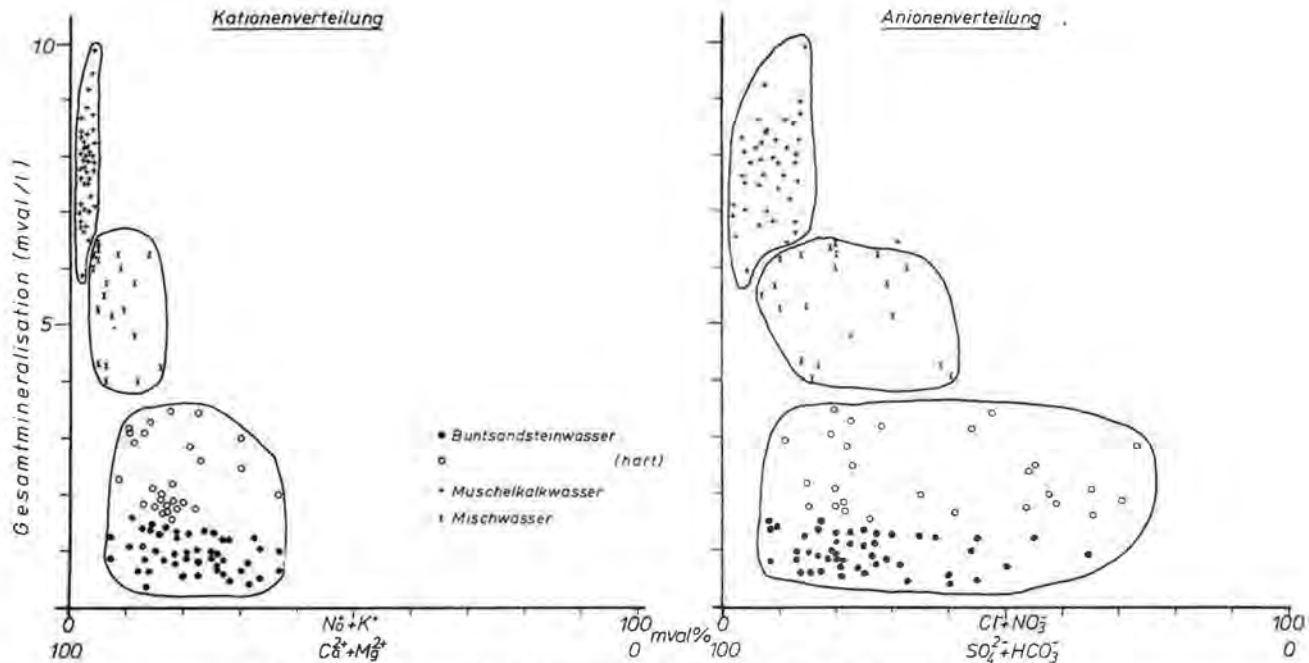


Fig. 2: Kationen- und Anionenverteilung der Grundwässer des Untersuchungsgebietes.

die Schwankungen des Calcium-Magnesium-Verhältnisses der Buntsandsteinwässer überwiegend auf unterschiedliche Calciumgehalte zurückzuführen.

Der Anionenchemismus aller drei Wassergruppen wird einerseits durch die primäre Beladung der Sickerwässer mit freiem  $\text{CO}_2$  (in den Deckschichten) und damit durch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, andererseits durch den Karbonatgehalt der durchflossenen Gesteine weitgehend geprägt. Die Muschelkalkwässer weisen durchgehend höhere und nahezu gleichbleibende Hydrogenkarbonatwerte auf, während die Buntsandsteinwässer je nach dem Karbonatgehalt der durchflossenen Sedimente relativ starken Schwankungen unterworfen sind. Bei den Mischwässern ist der Hydrogenkarbonatanteil vom Durchmischungsgrad Buntsandstein/Muschelkalkwasser abhängig. Der Inhalt an nichtkarbonatischen Bestandteilen in allen drei Wassergruppen, insbesondere die Chloride und Nitrate, bewegen sich in den Grenzen von 2–14 mg/l bzw. 0–5 mg/l, nur die Sulfatwerte zeichnen sich durch starke Schwankungen aus, die den Sulfatgehalten der Sedimente (Oberer Buntsandstein — Mittlerer Muschelkalk) entsprechen (vgl. Tabelle 1).

Zu diesem Schema sind lediglich nicht diejenigen Wasserproben einzuordnen, die anthropogenen Beeinträchtigungen unterliegen.

#### 4. Oberflächengewässer

Im Rahmen der hydrochemischen Bestimmungen wurden im Jahre 1971 die zehn wichtigsten Oberflächenwässer des Arbeitsgebietes untersucht. Die Proben wurden aus folgenden Wässern entnommen:

- **Premich, Brend und Aschach**, die hauptsächlich Buntsandsteingebiete entwässern;
- der **Nüdlinger Bach** bei Hausen, in dessen Einzugsgebiet sowohl Buntsandstein- als auch Muschelkalkschichten anstehen;
- die **Lauer**, die vorwiegend Muschelkalk- und Keuperwasser führt;
- an vier verschiedenen Stellen der **Saale**, zwischen Salz und Bad Kissingen, deren Wasser ein Mischwasser aus Buntsandstein-, Muschelkalk- und Keuperschichten darstellt.

Es zeigte sich, daß der Chemismus dieser Wässer dem Grundwasser, das diese Vorfluter speist, entspricht. Alle untersuchten Wässer stehen im Kalkkohlensäuregleichgewicht. Ursprünglich vorhandene aggressive Kohlensäure (besonders bei Buntsandsteingebieten entwässernden Vorflutern) ist durch turbulente Fließbewegung entwichen.

**Brend, Premich und Aschach** weisen eine Gesamtmineralisation von 2,05 (Premich) bis 2,6 (Brend) mval/l auf. Sowohl die Kationen- als auch die Anionenkonzentrationen liegen innerhalb der Grenzen der aus Buntsandsteingebieten bekannten Wässer und gehören dem

Tab. 1: Repräsentative Analysen aus Grund- und Oberflächenwässern des Untersuchungsgebietes

Buntsandsteinwasser	Buntsandsteinwasser (hart)			Muschelkalkwasser			Mischwasser (Bunts. u. Muschelk.)			Oberflächenwasser Fränk. Saale/Wehrhaus					
Entnahmedatum:	20. 6. 70	24. 11. 70		23. 7. 70			21. 8. 70			29. 6. 71					
Wassertemp. °C	7,5	9		8,5			9,5			19					
Leitf. $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-2}$	140	211		664			500			567					
pH-Wert	5,5	6,7		7,1			7			7,7					
Gesamthärte °dH	2	5		22,7			15,1			15,5					
Abdampfrost. mg/l	84	172		460			312			556					
freies CO <sub>2</sub> mg/l	57,42	32,28		97,2			24,50			9,1					
aggres. CO <sub>2</sub> mg/l	57,42	31,68		—			—			—					
Kationen															
	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%
Na <sup>+</sup>	4,10	0,19	20,00	5,85	0,25	12,02	2,90	0,13	1,57	7,00	0,30	5,23	15,00	0,65	10,30
K <sup>+</sup>	2,25	0,06	6,32	3,05	0,08	3,85	1,50	0,04	0,48	2,00	0,05	0,87	8,00	0,20	3,17
Mg <sup>2+</sup>	2,43	0,20	21,05	6,55	0,54	25,96	15,66	1,29	15,56	23,17	1,90	33,10	17,85	1,47	23,30
Ca <sup>2+</sup>	10,00	0,50	52,63	24,20	1,21	58,17	136,80	6,83	82,39	70,00	3,49	60,80	80,00	3,99	63,23
Fe <sup>2+</sup>	0,06	—	—	0,04	—	—	0,04	—	—	0,10	—	—	0,23	—	—
Summe:	18,84	0,95	100,00	39,69	2,08	100,00	156,90	8,29	100,00	102,27	5,74	100,00	121,08	6,31	100,00
Anionen															
Cl <sup>-</sup>	6,07	0,17	18,89	13,85	0,39	18,14	10,81	0,30	3,68	15,00	0,42	7,43	26,42	0,74	11,54
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	26,75	0,55	61,11	18,25	0,38	17,67	37,50	0,78	9,56	30,00	0,62	10,97	97,00	2,01	31,36
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,40	—	—	20,00	0,32	4,88	11,50	0,18	2,21	5,60	0,09	1,60	17,00	0,27	4,21
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11,15	0,18	20,00	64,68	1,06	49,31	421,04	6,90	84,55	275,81	4,52	80,00	201,36	3,39	52,89
Summe:	44,37	0,90	100,00	116,78	2,15	100,00	480,85	8,16	100,00	326,41	5,65	100,00	341,78	6,41	100,00
Kat. + An.	63,21			156,47			637,75			428,68			462,86		

hydrochemischen Typus der **normal-erdalkalischen Wässer mit überwiegendem hydrogenkarbonatischem Anteil** an.

Das Wasser des **Nüdlinger Baches** mit einem Gesamtmineralstoffgehalt von 5,6 mval/l stellt einen typischen Vertreter des Mischwassers aus Buntsandstein und Muschelkalk dar. Den höchsten Mineralstoffgehalt aller untersuchten Wässer weist die Lauer bei Althausen mit 9,54 mval/l auf. Die Gesamtmineralisation bleibt bis zur Mündung an der Saale bei Niederlauer weitgehend konstant (9,49 mval/l). Anhand dieser zwei Analysen an verschiedenen Punkten der Lauer wird die Abhängigkeit des Lauerwassers von der Stratigraphie vor allem durch die Änderung des Sulfat- und Hydrogenkarbonatgehaltes deutlich. Während die Sulfatkonzentration des Wassers im Süden bei Althausen 146 mg/l beträgt, nimmt sie nach Norden kontinuierlich ab und beträgt bei Niederlauer nur noch 127 mg/l. Demgegenüber ist eine Zunahme des Hydrogenkarbonatgehaltes von Süden (335,6 mg/l) nach Norden (356,3 mg/l) festzustellen. Das aus Keuperschichten (Gipskeuper) stammende sulfatreiche Wasser der Lauer bei Althausen wird auf seinem Weg nach Norden mit hydrogenkarbonatreichen Wässern aus dem Muschelkalk vermischt.

Das **Saale-Wasser** gehört der Gruppe der Mischwässer an. Durch die Entnahme von Proben an vier verschiedenen Punkten des Flusses war festzustellen, daß von Norden nach Süden der Mineralstoffgehalt kontinuierlich abnimmt. Von 546 mg/l Gesamtlösungsinhalt am Pegel Salz weist das Saale-Wasser bei Wehrhaus nur noch 462,9 mg/l auf. Die leichte Zunahme des Gehaltes an gelösten Mineralstoffen beim Kurgarten von Bad Kissingen (510 mg/l) ist auf die Zufuhr von Wasser aus den Mineralquellen dieses Raumes zurückzuführen, was sich im Anstieg des Natrium- und Chloridgehaltes bemerkbar macht. Diese Mineralisationsabnahme vom Norden nach Süden ist überwiegend durch die Abnahme der Ionen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{HCO}_3^-$  bedingt. Im Nordosten außerhalb des Arbeitsgebietes, wo die Saale überwiegend Gips-Keuper-Flächen entwässert, beträgt der Mineralstoffgehalt über 1000 mg/l und ist vorwiegend durch hohe Sulfatgehalte bedingt. Beim Eintritt der Saale in Muschelkalkgebiete mit hydrogenkarbonatreichem Grundwasser findet eine Verdünnung statt, die flußabwärts durch die Zufuhr von sehr mineralarmem Wasser aus dem Buntsandstein weiter fortschreitet.

Um die Abhängigkeit des Mineralstoffgehaltes der Saale von der Wasserführung herzuleiten, wurde im hydrologischen Jahr 1970 monatlich jeweils eine Wasserprobe aus dem Fluß (beim Kurgarten) entnommen. Es wurden dabei die Kationen Calcium und Magnesium und die Anionen Chlorid, Nitrat und Hydrogenkarbonat bestimmt und mit den monatlichen Abflüssen in Beziehung gebracht. Die Ergebnisse sind aus der Fig. 3 zu entnehmen. Es zeigte sich deutlich, daß eine abnehmende Wasserführung eine Erhöhung der Konzentration an  $\text{Ca}^{2+}$ ,

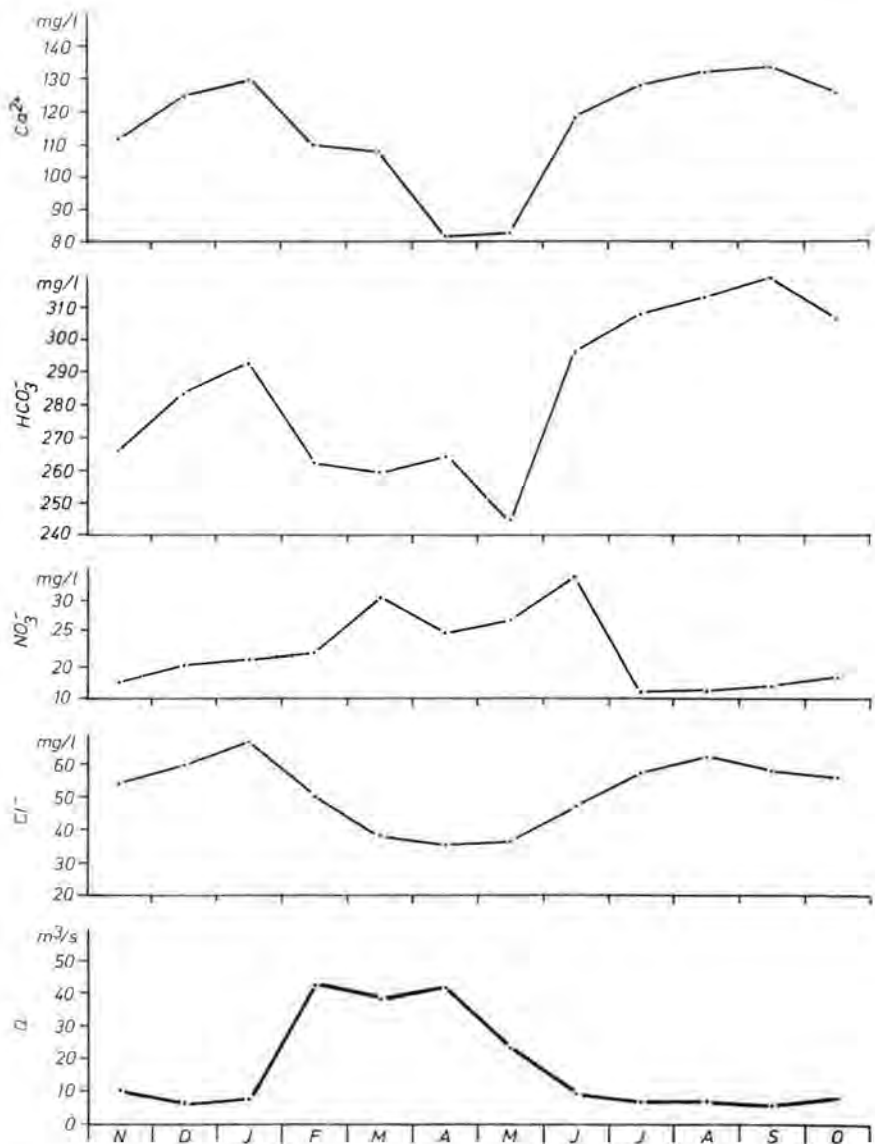


Fig. 3: Monatliche Konzentrationen der Saale an  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $NO_3^-$  und  $Cl^-$  in Abhängigkeit von der Wasserführung für das hydrologische Jahr 1970 bei der Entnahmestelle Kurgarten.

Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup> und HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> zur Folge hat, was auf die Herkunft dieser Ionen aus dem Grundwasser hindeutet. Die Nitratgehalte hingegen nehmen mit zunehmender Wasserführung zu; dieses ist dadurch zu erklären, daß bei hohen Niederschlägen der Saale Wasser zufließt, das durch Erosion kultivierter Böden hohe Nitratgehalte aufweist. Der Ursprung dieser Nitrate ist auf organische und anorganische Düngemittel zurückzuführen.

## Literatur

- (1) BUCHNER, A.: Die Schwefelversorgung der westdeutschen Landwirtschaft. — Landwirtsch. Forsch., 11, S. 79—92, Frankfurt/M., 1958.
- (2) Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Maingebiet, Abflußjahre 1960 bis 1970. — Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München 1961 bis 1971.
- (3) DEUTSCHE EINHEITSVERFAHREN ZUR WASSER-, ABWASSER- und SCHLAMM-UNTERSUCHUNG. — 3. Aufl. Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr. 1971.
- (4) DITTRICH, E.: Kohlensäure-Erkundung in der Vorderrhön. — Z. angew. Geol. 6, S. 249—253, Berlin 1960.
- (5) FURTAK, H. u. LANGGUTH, H. R.: Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. — Memoires I. A. H.-Kongreß 1965. Bd. VII, S. 89—96, Hannover 1967.
- (6) GEORGOTAS, N.: Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Bad Kissinger Raum unter besonderer Berücksichtigung der dortigen Heil- und Mineralquellen. — Diss. TU., 197 S., München 1972.
- (7) GEORGOTAS, N. u. UDLUFT, P.: Schwermetallgehalt und Mineralisation der Fränkischen Saale in Abhängigkeit von der Wasserführung. — Z. d. g. G., 124, S. 545—554, Hannover 1973.
- (8) GERB, L.: Grundwassertypen. — Vom Wasser, 25, S. 16—47, Weinheim/Bergstr. 1958.
- (9) HÄSSELBARTH, U.: Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht in natürlichen Wässern unter Berücksichtigung des Eigen- und Fremdelektrolyt-Einflusses. — GWF 104, H. 6, S. 157—160, München 1963.
- (10) HEM, J. D.: Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. — Geological Survey Water-Supply, Paper 1473, 269 S., Washington 1959.
- (11) HÖLL, K.: Wasser-Untersuchung, Beurteilung, Aufbereitung. — 393 S., 4. Aufl., Berlin 1968.
- (12) QUENTIN, K.-E.: Calcium- und Magnesiumbestimmung mit Natrium-äthylen-diamintetraessigsäure unter besonderer Berücksichtigung der Mineralwässer. — Z. Lebensmittelunters. u. Forsch. 102, S. 106—117, München 1955.
- (13) QUENTIN, K.-E.: Ermittlung des Gesamtgehaltes an Mineralstoffen in der Wasseranalyse. — Z. analyt. Chem. 146, S. 18—29, München 1955.
- (14) ULBRICH, R.: Die Herkunft der Nitrate und Chloride in Grundwässern der Umgebung von Würzburg und Grundwässer der Rhön. — Gesundheits-Ingenieur H. 5/6, S. 80—82, München 1957.

### Anschrift des Verfassers:

Dr. N. GEORGOTAS, Lehrstuhl für Hydrogeologie und Institut für Wasserchemie und Chemischer Balneologie der TU München (Vorstand:  
Prof. Dr. K.-E. QUENTIN, D-8 München 70, Marchioninstraße 17.

