DIE CHEMISCHE BESCHAFFENHEIT DER QUELLWÄSSER IM MITTLEREN BEREICH DES MAINDREIECKS (UNTERFRANKEN/SÜDDEUTSCHLAND)

von Georgios Stamatis

mit 11 Abbildungen und 1 Tabelle

Kurzfassung:

Die Untersuchungen geben einen Überblick über die hydrogeologischen Verhältnisse im mittleren Bereich des Maindreiecks und die physikalisch-chemischen Eigenschaften der in diesem Raum austretenden Quellwässer. Von den im Untersuchungsgebiet 120 lokalisierten Quellaustritten wurden nach geologisch-hydrogeologischen Gesichtspunkten 60 Quellen hydrochemisch untersucht.

Die statistische Auswertung von 170 Vollanalysen an Quellwässern ermöglicht quantitative Aussagen über die geogenen Wechselbeziehungen zwischen Grundwasserchemismus und Aquifer in dem petrographisch unterschiedlich ausgebauten Untersuchungsgebiet (Muschelkalk, Keuper, Quartär).

Anthropogene Einflüsse äußern sich bei den nicht gesteinsspezifischen Ionen durch erheblich erhöhte Konzentrationswerte.

Inhalt

1. Einleitung

2. Geologische Verhältnisse
2.1 Geologischer Überblick
2.2 Schichtenfolge

3. Tektonische Situation

4. Hydrogeologische Verhältnisse

5. Beschaffenheit der Quellwässer
5.1 Allgemeines
5.2 Physikalische und chemische Eigenschaften
5.2.1 Quellwässer des Unteren Keupers
5.2.2 Quellwässer des Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalkes
5.2.3 Quellwässer des Quartärs

6. Schlußfolgerungen

7. Literaturverzeichnis

1. Einleitung

Gegenstand der vorliegenden hydrochemischen Untersuchungen sind die Quellwässer im mittleren Bereich des Maindreiecks (Abb. 1). Naturräumlich hat das Untersuchungsgebiet Anteil an den Mainfränkischen Platten, wobei der Untergrund aus Schichten triassischer Gesteine sowie aus Ablagerungen des Quartärs gebildet wird.

Die weiträumig gegliederte, flach gewellte unterfränkische Gäulandschaft wird im wesentlichen von den Bächen Kürnach, Pleichach und Dürrbach zum Main hin entwässert. Die Bäche speisen zahlreiche Quellen unterschiedlicher Herkunft. Einige Quellen wurden ehemals für die örtliche Wasserversorgung genutzt. Die bekanntesten und ergiebigsten und heute noch genutzten Quellaustritte sind die Würzburger Bahnhofsquellen, die rund ein Viertel des Wasserbedarfes der Stadt Würzburg decken.

Die hydrogeologische Situation im Bereich des Maindreiecks war schon früher Gegenstand vieler Untersuchungen. Das wissenschaftliche Interesse richtete sich bisher vorwiegend auf die Würzburger Bahnhofsquellen. Die übrigen, aufgrund ihrer Schüttung weniger bedeutenden Quellen, fanden in der Regel keine oder nur beiläufige Beachtung. Über ihre chemische Zusammensetzung und ihre Beziehung zum geologischen Verband liegen bisher nur wenige Angaben vor.

Diese Situation gab den Anlaß dazu und die Beschaffenheit der auftretenden Quellwässer, ihre geologische Herkunft sowie schließlich die wechselseitige Beziehung zwischen den Quellwässern und ihrem Grundwasserleiter näher zu untersuchen. Eine systematische Quellkartierung und die physikalisch-chemischen Analysen der Wässer bildeten hierbei die wesentlichsten Untersuchungsschritte.

Darüber hinaus sollte ermittelt werden, inwieweit in diesem überwiegend landwirtschaftlich intensiv genutzten Einzugsgebiet eine Beeinträchtigung des Grundwassers durch Oberflächenfaktoren gegeben ist.

Die Untersuchungen wurden in den hydrologischen Jahren 1982 und 1983 durchgeführt.

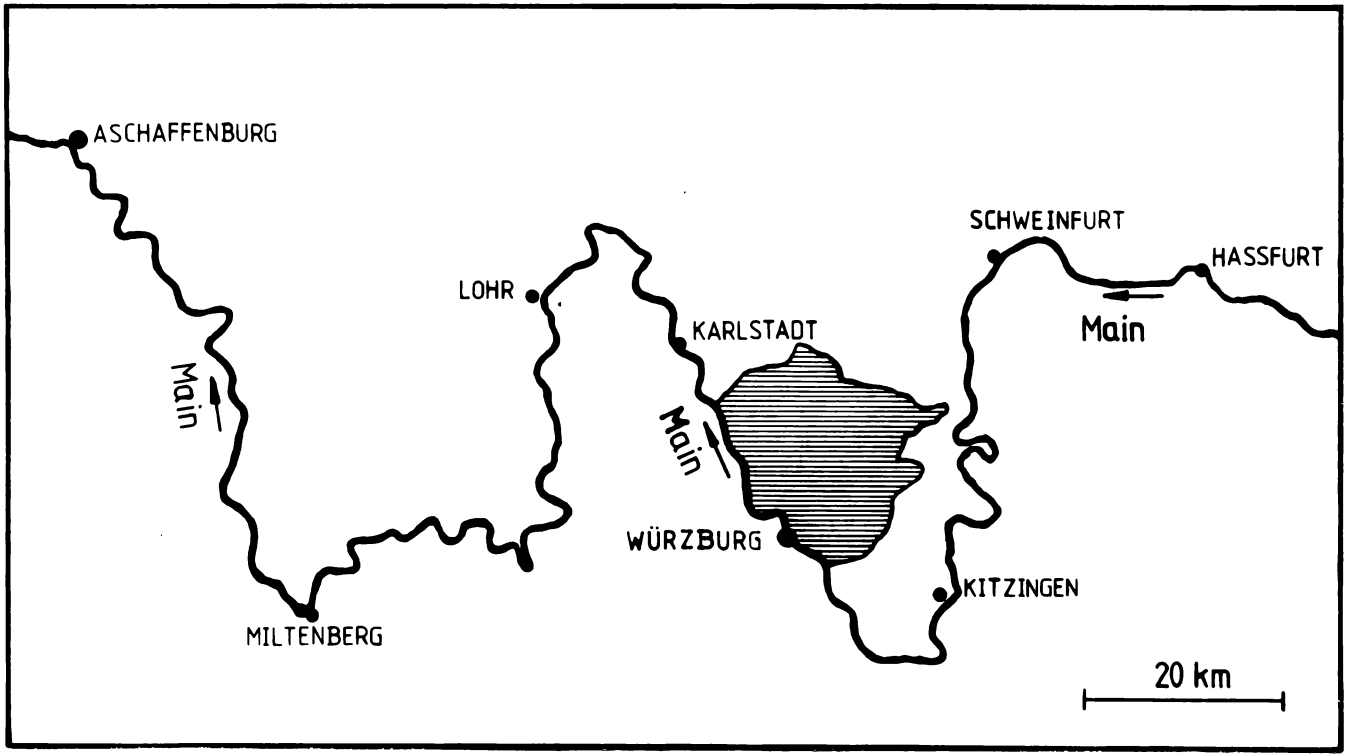


Abb.1: Lage des Untersuchungsgebietes

Die vorliegende Arbeit ist ein Auszug einer Dissertation, die im Jahre 1986 beim Institut für Geologie der Universität Würzburg eingereicht wurde. Im Rahmen der Dissertation wurden des weiteren die hydraulischen Zusammenhänge zwischen Talgrundwasser und Main im Stadtbereich Würzburg untersucht. Diese Untersuchungen sind nicht Gegenstand des vorliegenden Auszugs der Dissertation.

2. Geologische Verhältnisse

2.1 Geologischer Überblick

Die im Untersuchungsgebiet ausstreichenden triassischen Gesteine bilden eine zusammenhängende Schichtenfolge, die von den Röttonen des Oberen Buntsandsteins bis zu den Myophorienschichten des Mittleren Keupers reicht (Abb.2). Die steilen Talhänge des Mains und seiner Zuflüsse werden in der Regel von den harten Karbonatgesteinen des Muschelkalkes gebildet. Dagegen sind die sanfteren Formen der Gäufläche auf die weicheren Ton- und Sandsteine des Unteren und Mittleren Keupers zurückzuführen. Durch das generelle Südosteinfallen der Schichten bedingt, streichen im Westen des Untersuchungsgebietes vorwiegend Schichten des Muschelkalkes sowie vereinzelt des Oberen Buntsandsteines aus, während im Osten vor allem Schichten des Unteren und Mittleren Keupers verbreitet sind (Abb. 3).

Von den quartären Ablagerungen sind die äolischen Verfrachtungssedimente Löß-, Lößlehm und Flugsand, treten vorwiegend auf ostexponierten Lagen sowie im Bereich der Gäufläche in größeren Mächtigkeiten und flächenhafter Verbreitung auf, verbreitet. Fluviatile Talaufschüttungen sind vor allem im Maintal vorhanden.

2.2 Schichtenfolge

Die stratigraphische Abfolge der im Untersuchungsgebiet ausstreichenden geologischen Schichten geht im einzelnen aus dem stratigraphischen Übersichtsprofil hervor (Abb. 2).

Der Obere Buntsandstein, vertreten durch die Oberen Röttonsteine, den Rötquarzit und die Unteren Röttonsteine, streicht im nordwestlichen Raum des Untersuchungsgebietes in der Umgebung von Thüngersheim aus. Sein Auftreten hängt mit der tektonischen Aufwölbung des Thüngersheimer Sattels zusammen.

Die v. g. Schichtglieder der Rötformation weisen eine Mächtigkeit von insgesamt ca. 42 m auf (HOFFMANN 1967a) und sind im Untersuchungsgebiet größtenteils von quartären Mainablagerungen und Flugsand überdeckt.

Die klastische Sedimentation des Buntsandsteins wurde durch eine marin geprägte ersetzt, die zu der mächtigen Kalksteinbildung des Muschelkalkes führte.

Der Untere Muschelkalk (Wellenkalk) besteht aus einer Wechselfolge von vorwiegend kalkigen Sedimenten mit sehr unterschiedlicher petrographischer Zusammensetzung. Die dünnplattigen, dicht aufeinander gepreßten, schwach mergeligen Kalksteinbänkchen, die durch ein welliges Gefüge charakterisiert sind, werden durch dünne, zwischengelagerte Tonsteinschichten getrennt. Die Mächtigkeit des Wellenkalkes beträgt im betrachteten Raum ca. 90 m (HOFFMANN 1967a, 1967b).

Der Mittlere Muschelkalk wird aus einer Wechsellagerung von dolomitischen Kalk-, Mergel-, Mergelkalk-, Gelb- und Zellenkalksteinen sowie Anhydrit- und Gipssteinen gebildet. Überwiegend in der unteren Hälfte dieser Abfolge treten primär zwischengelagerte Gips- und Anhydritgesteine auf; diese sind bereichsweise ausgelaugt. Die Mächtigkeit des Mittleren Muschelkalkes beträgt im untersuchten Raum ca. 40 m (HOFFMANN 1967a, 1967b). Die charakteristischen ockergelben, plattigen oder zelligen dolomitischen Kalksteine und die hellgrauen, leicht verwitternden Residualtone und -mergel streichen ausschließlich im stark zertalten westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes aus. Dagegen werden die Schichten des Muschelkalkes im östlichen Bereich von den überwiegend tonigen Ablagerungen des Kèupers überlagert (Abb. 3).

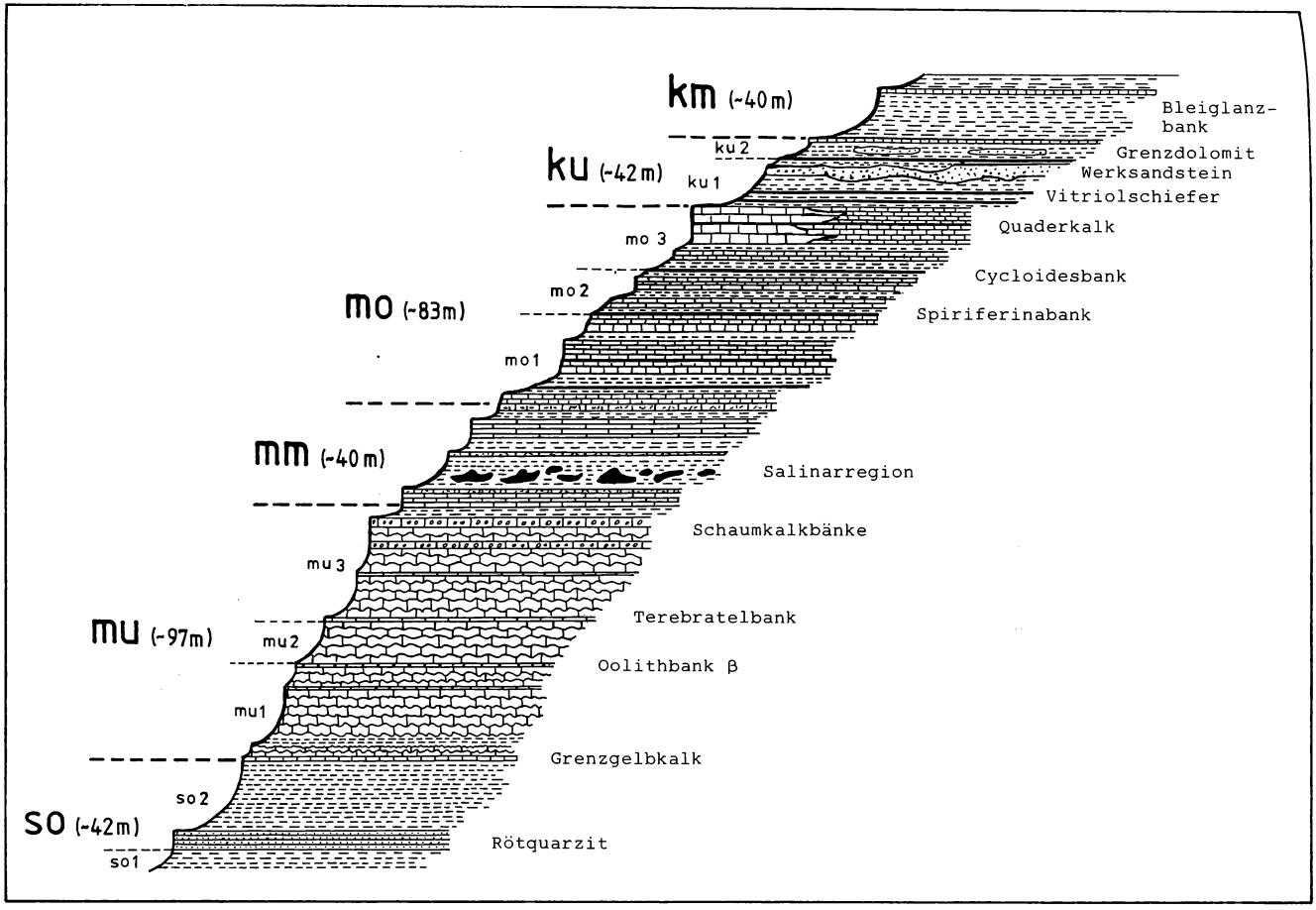


Abb.2: Stratigraphisches Übersichtsprofil

Der Obere Muschelkalk setzt sich im wesentlichen aus blau- bis hellgrauen, dichten, bituminösen Plattenkalksteinenbänken sowie aus Ton- und Mergelsteinlagen zusammen. Letztere treten überwiegend über der Basis und im oberen Bereich der Schichtenfolge auf (Abb. 2).

Der Obere Muschelkalk bildet aufgrund seiner Resistenz Steilanstiege der Talhänge und die Hochebenen des westlichen Untersuchungsgebietes aus. Die Hochflächen werden zum größten Teil von äolischen Sedimenten überdeckt.

Im Südwesten des Untersuchungsgebietes tritt der Obere Muschelkalk nicht nur in Normalfazies (sog. Tonplattenfazies) sondern auch in Quaderkalkfazies auf. Diese Quaderkalkfazies ist durch schalentrümmerführende, dickbankig ausgebildete Kalksteine charakterisiert und deutet auf einen küstennahen Sedimentationsraum hin. Der Obere Muschelkalk weist im Untersuchungsraum eine mittlere Mächtigkeit von ca. 80 m auf (HOFFMANN 1967a, 1967b).

Der Untere Keuper oder auch Lettenkeuper (aufgrund kohliger Horizonte sog. "Anthrakonite") ist durch laterale und vertikale Fazieswechsel geprägt. Die dominierenden Gesteinsarten dieses Schichtkomplexes sind Ton- und Sandsteine, Mergel- und Kalksteine. Sie belegen den faziellen Übergang vom marinen Hauptmuschelkalk zum überwiegenden kontinentalen Keuper. Die Lettenkeuperschichten sind überwiegend im mittleren und östlichen Bereich des betrachteten Raumes verbreitet und bilden die Gäuflächen (Abb. 3). Die Mächtigkeit beträgt ca. 40 m (HEROLD 1981, SCHOLZ 1982, v. RODA 1984).

Im unteren Bereich des stratigraphischen Profils herrschen meistens Tonsteine, Mergelkalke und dolomitische Kalksteine vor. Im mittleren und oberen Teil überwiegen Sand- und Tonsteine. Die auftretenden Kalk- und Dolomitsteine sind teilweise durch Eisenverbindungen gelb und braun gefärbt.

Ebenso wie die Kalke zeigen auch die Ton- und Sandsteine eine heterogene Ausbildung. Ihre Farben wechseln von blaugrau über grüngrau bis dunkelrot und violett.

Am Top des Lettenkeupers steht der Grenzdolomit an. Aufgrund seiner Widerstandsfähigkeit bildet er weitflächige Geländeverebnungen aus.

Der Mittlere Keuper streicht im äußersten Osten des Untersuchungsgebietes aus und wird durch das Auftreten der Basisschichten (Myophorienschichten und Bleiglanzbank) belegt. Die Mächtigkeit dieser dolomitischen, zum Teil schiefrigen Tonsteine und Steinmergel beträgt ca. 30 m (HEROLD 1981).

Diese unter marin-brackischen Sedimentationsbedingungen entstandenen vergleichsweise wenig widerstandsfähigen Gesteinsschichten sind durch Gips- und Anhydritvorkommen gekennzeichnet. Sie schließen die mesozoische Schichtenfolge des betrachteten Raumes ab.

Quartäre Ablagerungen sind im Untersuchungsgebiet Löß, Lößlehm, Flugsand, Hangschutt, Talfüllungen sowie Auebildungen (Abb. 3).

Löß- und Lößlehmvorkommen befinden sich überwiegend auf den Gäuflächen und auf den nach Osten und Nordosten gerichteten Hängen. Sie erreichen an manchen Stellen Mächtigkeiten von über 10 m (HEROLD 1981).

Die fluviatilen Aufschüttungen im Maintal werden von Schottern, Kiesen, Sanden sowie von Mergeln und Lehmen aufgebaut. Ihre Mächtigkeit ist im einzelnen sehr unterschiedlich. Sie schwankt im Würzburger Raum zwischen wenigen Metern und ca. 32 m (ULBRICH 1952, STAMATIS 1986).

Die Talfüllungen der Hauptnebentäler und der zahlreichen, in den Muschelkalk eingeschnittenen, sehr engen und steilen Trockentäler bestehen aus Verwitterungsschutt und Abschwämmprodukten der Talflanken. Sie sind im Vergleich zu den Ablagerungen des Maintales nur geringmächtig.

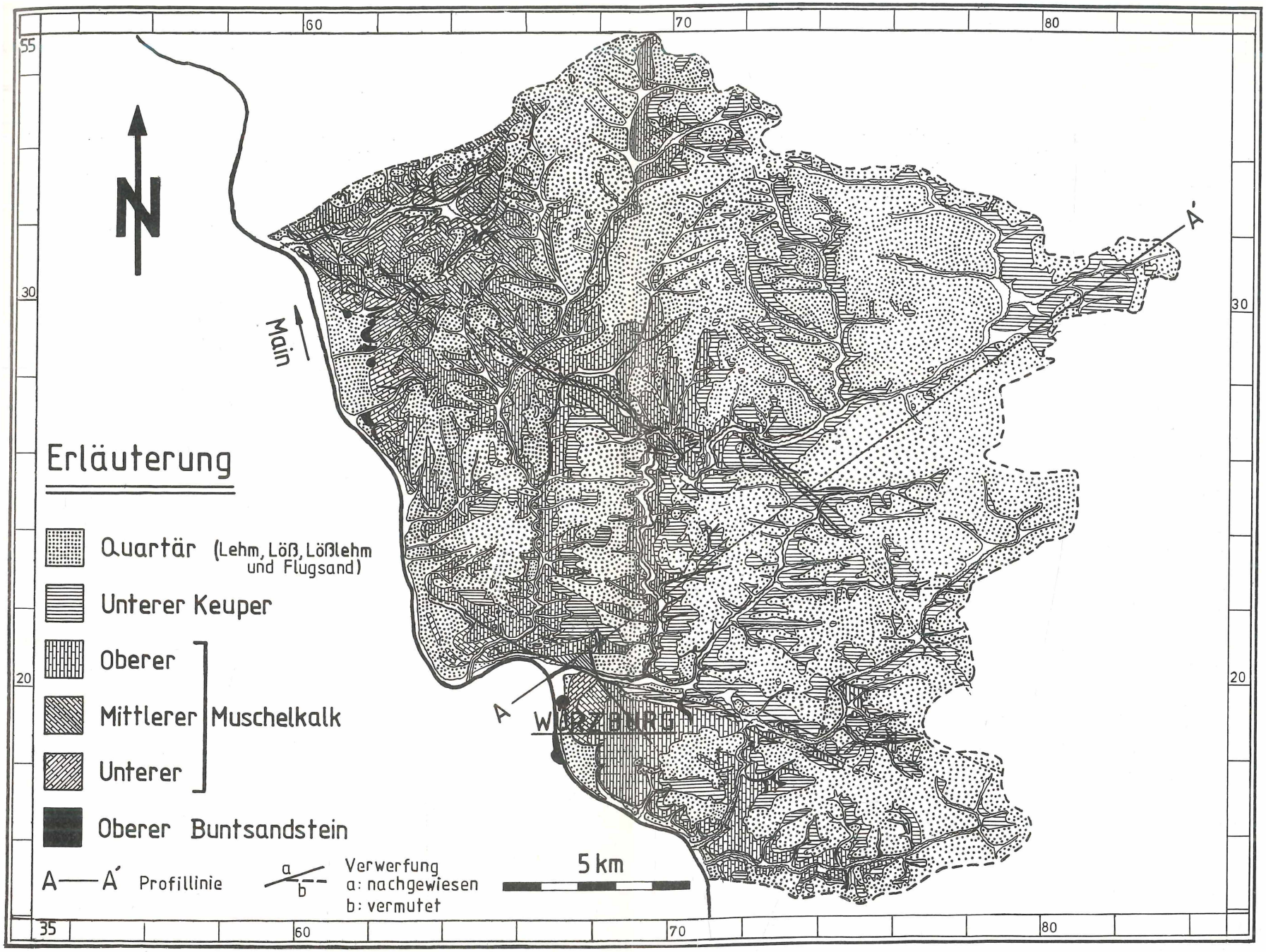


Abb.3: Geologische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes

3. Tektonische Situation

Der betrachtete Raum gehört zur Fränkischen Triasplatte und liegt im Norden der Süddeutschen Großscholle (CARLÉ 1955). Infolge der Aufwölbung der Mitteldeutschen Hauptschwelle weisen die Schichten überregional ein generelles Einfallen nach Südosten auf.

Im Bereich des Untersuchungsgebietes wird die Schichtlagerung im wesentlichen von Südwest-Nordost-verlaufenden Sattel- und Muldenstrukturen sowie herzynisch (Nordwest-Südost) streichenden Bruchstrukturen geprägt.

Bei den Sattel- und Muldenstrukturen handelt es sich um Aufbeulungen und Einmuldungen geringen Ausmaßes, d. h. die Schichten verfügen über eine sehr geringe Neigung. Für ihre Entstehung sollen vertikale Krustenbewegungen verantwortlich sein (KIRCHNER 1934, ULBRICH 1952, RUTTE 1957, HEIMBACH 1958). Die das Untersuchungsgebiet beherrschenden Südwest-Nordost-streichenden Verbiegungseinheiten sind:

der Thüngersheimer Sattel, der einer der markantesten tektonischen Strukturen von Unterfranken ist,

die Zell-Veitshöchheim-Rimparer-Mulde,

die Hochstruktur zwischen Versbach-Maidbronn und Unterdürrbach und

die Bergtheimer Mulde.

Neben den o. g. Verbiegungseinheiten durchqueren den Bereich des Maindreiecks zwei markante Nordwest-Südost-streichende Bruchstörungszonen:

die Würzburg-Hauptbahnhof-Rottendorf-Störungszone und

die Rimpar-Kürnach-Störungszone (Abb. 4).

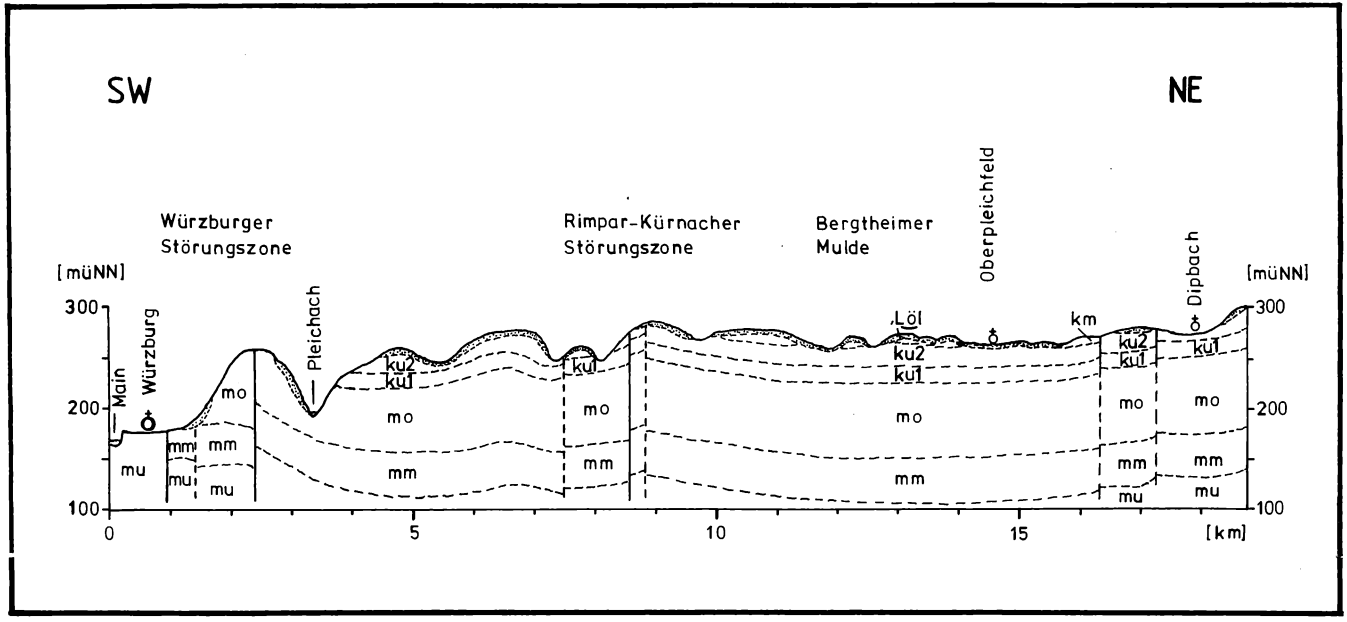


Abb.4: Querprofil im südlichen Raum des Untersuchungsgebietes (vgl.Abb.3)

Es handelt sich dabei um schmale, langgestreckte Bruchsysteme, die sich auch außerhalb des betrachteten Raumes fortsetzen und eine Dislokationszone darstellen (HEIMBACH 1958, CRAMER 1964, HOFFMANN 1967a, 1967b).

Nach RUTTE (1957) und HEIMBACH (1958) sollen die Verbiegungselemente zeitgleich mit der letzten Heraushebung der Mitteldeutschen Schwelle entstanden sein. Letztere fand am Ende des Unterpliozäns und im Mittelpliozän statt.

4. Hydrogeologische Verhältnisse

Die hydrogeologischen Verhältnisse im mittleren Bereich des Maindreiecks sind aufgrund der vorliegenden geologischen und tektonischen Verhältnisse lokal sehr differenziert. Von den im Untersuchungsgebiet vertretenen Schichten sind vor allem die mächtigen Karbonatgesteine des Muschelkalkes, die mehr oder weniger mächtigen Sandsteinhorizonte des Unteren Keupers sowie die quartären Ablagerungen im Maintal für die Grundwasserführung von Bedeutung. Die Gesteine des Muschelkalkes verfügen über Eigenschaften eines Karst-/Kluftgrundwasserleiters, während die Gesteine des Unteren Keupers als Kluftgrundwasserleiter und die quartären Ablagerungen als Porengrundwasserleiter zu bezeichnen sind.

Die Karbonatgesteine des Muschelkalkes zeichnen sich in Bereichen mit mehrfacher tektonischer Beanspruchung durch eine ausgeprägte Klüftigkeit aus, die bereichsweise mit einer tiefreichenden Verkarstung einhergeht. Auf letztere lassen Dolinen (Abb. 5) und zahlreiche tiefeingeschnittene Trockentäler schließen.

Der Untere Muschelkalk gilt mit Ausnahme der Schaumkalkbänke allgemein als wenig ergiebiger Grundwasserhorizont. Bei ausreichender Klüftung sind an der Basis (Grenzgelbkalk) und an der Obergrenze dieses Gesteinskomplexes (Schaumkalkbänke) Quellaustritte, wie z. B. Q:106, Q:107, Q:108 (Abb. 5), zu beobachten. Die mittlere maximale Schüttung aus diesem Quellhorizont liegt bei ca. 4, 7 l/s. Eine relativ hohe mittlere Schüttung wurde bei der Quelle Q:115 im Retzbachtal festgestellt (10,3 l/s). Ihre Ergiebigkeit hängt

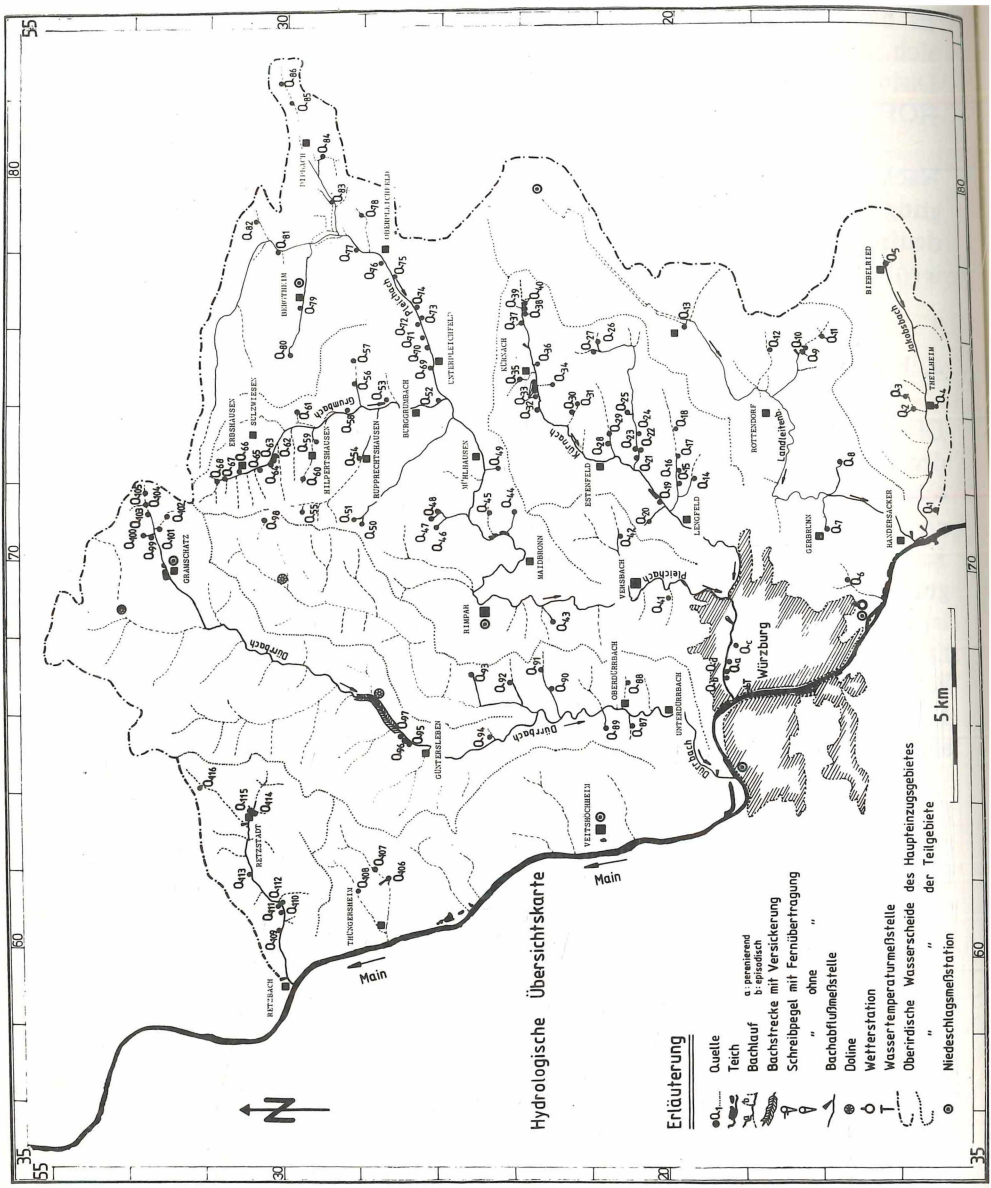


Abb.5: Hydrologische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes

sehr wahrscheinlich mit der tektonischen Situation des Raumes zusammen, die zur Bildung von Stauquellen geführt hat.

Die allgemein relativ geringe Anzahl von Quellaustritten aus dem Unteren Muschelkalk im Bereich des Untersuchungsgebietes ist vermutlich auf die vergleichsweise starke Klüftigkeit des Gebirges zurückzuführen, die zu einer raschen vertikalen Versickerung des Grundwassers beiträgt. Ein bedeutender Anteil des Muschelkalkwassers speist dadurch direkt in das Talgrundwasser der Hauptnebentäler ein.

Der Mittlere Muschelkalk führt in den weit zerklüfteten dolomitischen Kalksteinen und porösen Zellenkalken über undurchlässigen Mergelschiefern reichlich Wasser. In verkarsteten Bereichen und vor allem dort, wo die Auslaugung der Gips- und Anhydritgesteine ausgeprägte Hohlräume hervorgerufen hat, ist mit einer ausgesprochenen Wasserwegsamtkeit und -reservoirbildung zu rechnen. Die ergiebigsten Quellen im Untersuchungsgebiet sind die an der Würzburg-Hauptbahnhof-Rottendorf-Störungszone austretenden (Stauquellen) Würzburger Bahnhofsquellen Q_a, Q_b, Q_c, Q_d (Abb. 5). Ihre Schüttung schwankte im Untersuchungszeitraum zwischen 107,0 l/s und 158,0 l/s (STAMATIS 1986). Die Quellen werden für die Wasserversorgung der Stadt Würzburg genutzt.

Der Obere Muschelkalk weist im Untersuchungsgebiet in Bezug auf die Grundwasserführung sehr differenzierte Verhältnisse auf. Im östlichen Bereich ist er unter einer mächtigen, grundwasserhemmenden, überwiegend tonigen Überdeckung des Unteren Keupers weitgehend abgeschirmt. Im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes streicht der Obere Muschelkalk größtflächig an der Oberfläche aus und ist infolge der ausgeprägten Klüftigkeit sehr gut wasserwegsam. Diese Klüftigkeit tritt in den Bereichen besonders stark auf, in denen die Auslaugung der Gips- und Anhydritgesteine und die Verkarstung des Mittleren Muschelkalkes zu einer Destabilisierung der darüberliegenden Kalkgesteine des Oberen Muschelkalkes führt.

Trotz Einschaltungen von mehreren tonigen Horizonten im stratigraphischen Profil des Oberen Muschelkalkes ist dieser Gesteinskomplex überregional als wasserdurchlässig zu betrachten.

In tektonisch unbeanspruchten Gebieten können im Oberen Muschelkalk regional zwei charakteristische Quellhorizonte ausgeschieden werden. Der obere Horizont liegt ca. 10 m bis 25 m unter der Muschelkalk-/Keupergrenze (Q:2, Q:7, Q:8); der untere etwa 10 m über der Basis des Oberen Muschelkalkes (Q:6, Q:87, Q:89 (Abb. 5)). Der Zeller-Tonsteinhorizont im unteren Bereich und die Tonsteinhorizonte im oberen Bereich des Oberen Muschelkalkes bilden durch ihre Staufunktion eine wirksame Grundwassersohle.

Der Untere Keuper ist infolge seiner Wechsellagerung von tonigen und sandigen Schichten mit zwischengelagerten kalkigen und dolomitischen Bänken durch eine hohe Anzahl von Schichtquellen gekennzeichnet. Aufgrund der geringmächtigen Grundwasserleiter besitzen diese meist schwach schüttenden Quellen im Untersuchungsgebiet relativ kleine Einzugsgebiete. Eine Ausnahme bildet örtlich der Werksandstein, der bei entsprechender Mächtigkeit und Ausbildung Quellschüttungen von mehreren l/s aufweist.

Die quartären Überdeckungssedimente spielen infolge ihrer geringen Mächtigkeit als Grundwasserleiter im Untersuchungsgebiet keine wichtige Rolle. In ihrem Bereich treten nur episodische Quellen auf. Die quartären Sedimente sind insofern bedeutsam, daß sie indirekt über die Bodenbildung die Grundwasserneubildung der darunterliegenden Triasschichten erheblich beeinflussen können.

Die fluviatilen Ablagerungen des Quartärs (Sande, Kiese und Schotter) im Bereich des Maintales bieten reichliche und nutzbare Speichergesteine. Die Porositäten und Mächtigkeiten dieser quartären Aquifere weisen i. d. R. günstige Verhältnisse auf, so daß ihre Wasserführung auch von wirtschaftlicher Bedeutung ist.

5. Beschaffenheit der Quellwässer

5.1 Allgemeines

Zu Beginn der hydrogeologischen Untersuchungen wurde im Arbeitsgebiet eine systematische und möglichst lückenlose Quellkartierung durchgeführt. Insgesamt wurden 120 Quellen aus verschiedenen Grundwasserleitern lokalisiert (Abb. 5). Nach geologisch-hydrogeologischen Gesichtspunkten wurden 60 Quellen ausgesucht und hydrochemisch untersucht.

Von den physikalischen Parametern wurden im Untersuchungszeitraum die Schüttung, die Temperatur sowie die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert und die O_2-Sättigung in monatlichen Abständen gemessen.

Die chemischen Untersuchungen umfaßten die Hauptbestandteile Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, Cl^{-}, SO_4^{--} und NO_3^{-} und die Nebenbestandteile SiO_2, HPO_4^{--}, NH_4^{+} sowie NO_2^{-}. Des weiteren wurde die organische Belastung als $KMnO_4$-Verbrauch und die Härte bestimmt.

Die untersuchten Quellen werden alle aus Grundwasserleitern gespeist, die im Untersuchungsgebiet bereichsweise an der Geländeoberfläche ausstreichen. Die grundwasserführenden Horizonte liegen somit in mehr oder weniger oberflächennahem Gebirgsbereich. Die Zirkulation der austretenden Quellwässer findet überwiegend im Grundwasserleiter selbst statt, so daß sich im Chemismus der Quellwässer meistens die petrochemische Zusammensetzung des jeweiligen grundwasserführenden Horizontes widerspiegelt. Diese als "autochthone Wässer" zu bezeichnenden Grundwässer (GEORGOTAS und UDLUFT 1978) können im Sinne von GERB (1958) dem vorliegenden stratigraphischen Verband eingeordnet werden.

Um einen Überblick über die hydrochemischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet zu bekommen, wurden in Abbildung 7 die durchschnittlichen Konzentrationswerte der Hauptbestandteile sowie die Höhe der Gesamt- und Karbonathärte in Form von Säulendiagrammen dargestellt.

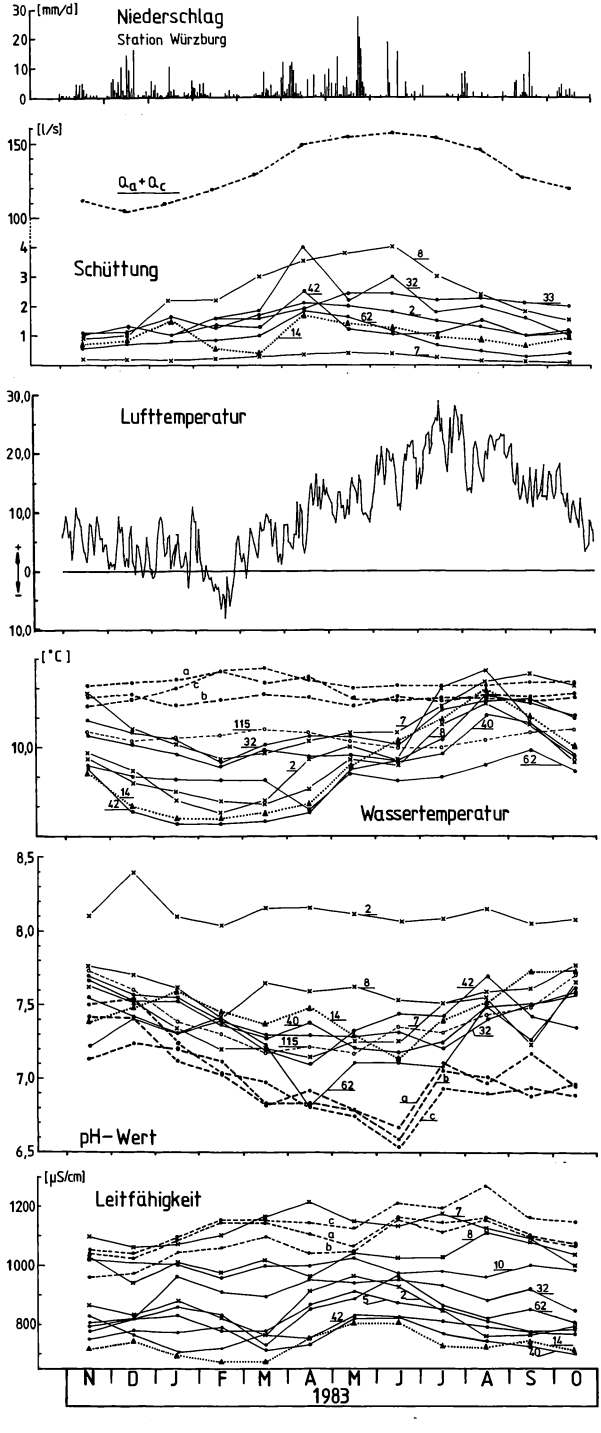


Abb.6: Gegenüberstellung der Leitfähigkeit, des pH-Wertes, der Wassertemperatur und Schüttung der Quellen sowie der Lufttemperatur und der täglichen Niederschlagshöhen

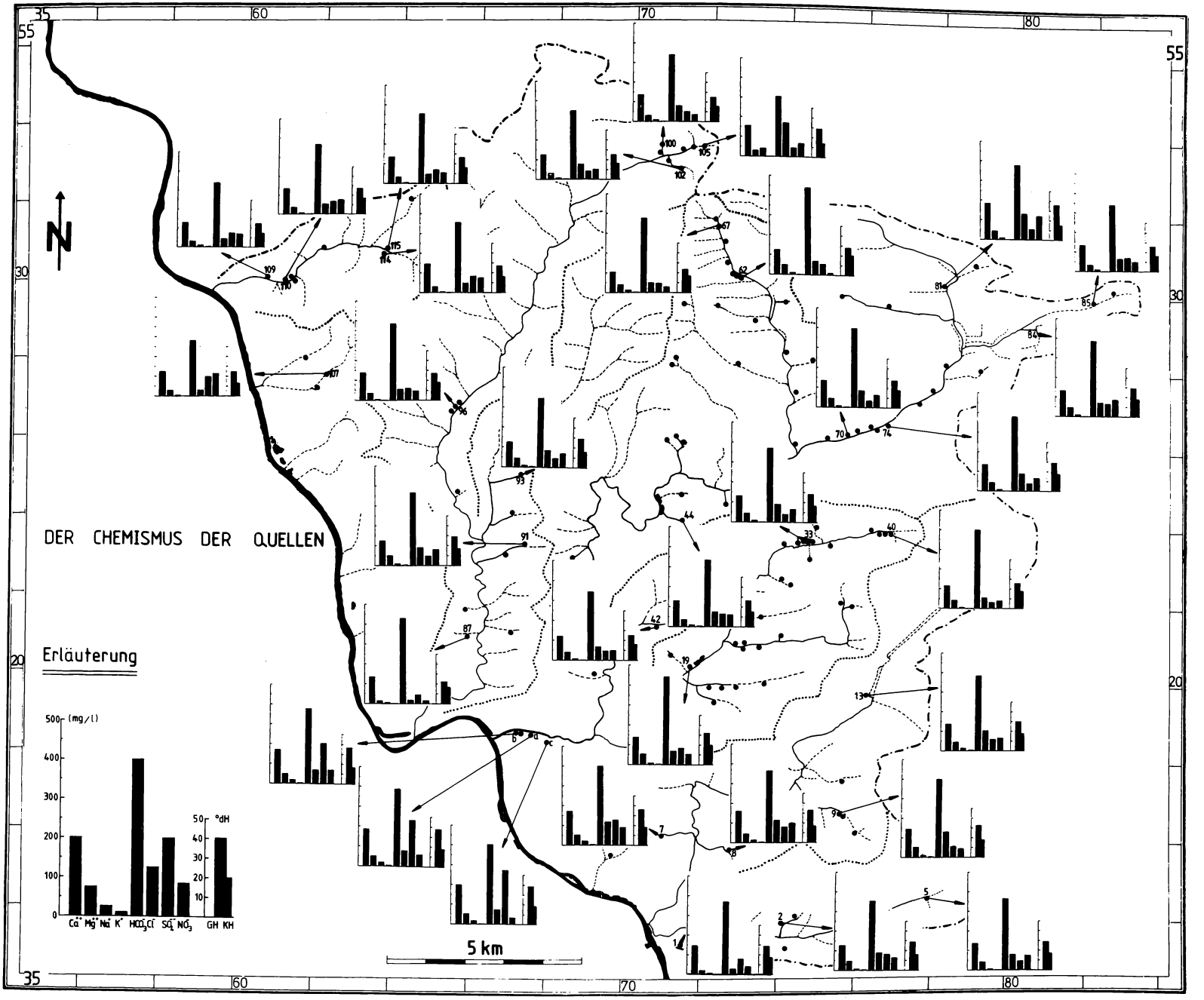


Abb.7: Hydrochemische Zusammensetzung der Quellwässer des Untersuchungsgebietes (Aus Gründen der Vereinfachung wurden benachbarte Quellen mit verwandtem Chemismus nicht dargestellt)

5.2 Physikalische und chemische Eigenschaften

5.2.1 Quellwässer des Unteren Keupers

Schüttung

Der Untere Keuper zeichnet sich durch den raschen horizontalen wie vertikalen Fazieswechsel aus, woran zahlreiche jedoch nur gering schüttende Quellaustritte gebunden sind. Die Schüttung der überwiegenden Zahl der Quellen aus Unterem Keuper (z. T. mit Quartärüberdeckung) schwankt erheblich, und zwar i. d. R. von wenigen Zehntel l/s bis zu ca. 6,0 l/s (Tab. 1).

Die durchschnittliche gemeinsame hohe Schüttung der Quellaustritte Q:38, Q:39 und Q:40, östlich von Kürnach im Kürnachtal (Abb. 5) ist mit 25,3 l/s für Quellen aus dem Unteren Keuper vergleichsweise hoch. Die Ergiebigkeit der Quellen wird durch die tektonische Anlage der Bergtheimer Mulde begünstigt. Der Grundwasserabstrom findet von den Flanken der Mulde in Richtung des Schichteinfalles zu den im tiefsten Muldenbereich (Muldenachse) liegenden Quellaustritten statt.

Die Quellen des Unteren Keupers weisen einen jahreszeitlich charakteristischen Schüttungsgang auf, wobei ihre Abflußmaxima im Frühjahr und ihre Abflußminima im Herbst erkennbar werden (Abb. 6). Kurzfristige Schüttungserhöhungen sind nach starken Niederschlägen bei Quellen oberflächennaher Grundwasservorkommen im Unteren Keuper zu beobachten.

Temperatur

Die Mehrzahl der Quellen des Unteren Keupers zeigen einen charakteristischen Jahresgang, wobei höhere Temperaturwerte auf die Sommermonate und niedrige Temperaturwerte auf die Wintermonate verteilt sind (Abb. 6). Quellen mit mächtigeren Aquiferen (z. B. Werksandstein, vgl. Abb. 2) zeigen einen ruhigeren Temperaturverlauf. Allgemein schwankt die Wassertemperatur bei den Quellen des Unte-

ren Keupers zwischen 6,5 °C und 12,3 °C. Der Durchschnittswert beträgt 9,2 °C (Tab. 1).

Leitfähigkeit

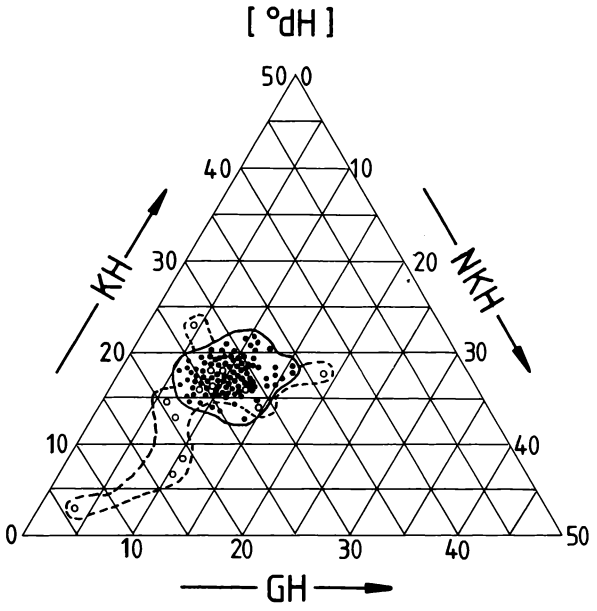
Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit gibt einen ersten Hinweis auf die Höhe des Gesamtmineralgehaltes der Quellwässer. Die Werte bei den Quellen des Unteren Keupers schwanken zwischen 608 µS/cm und 1120 S/cm (bei 25 °C). Der Mittelwert liegt bei 880 µS/cm (Tab. 1). Die relativ breite Streuung der Werte ist vor allem bei oberflächennahen Grundwasservorkommen durch den raschen Zufluß von Oberflächenwässer im Quellbereich begründet. Dies führt zeitweise zu einer Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit der Quellwässer. Aus der Abbildung 6 wird ersichtlich, daß die elektrische Leitfähigkeit eine direkte Beziehung zu der gemessenen Schüttung zeigt, d. h. mit zunehmender Schüttung tritt eine Abnahmne der elektrischen Leitfähigkeit auf.

pH-Wert

Die Messungen ergaben pH-Werte zwischen 6,81 und 8,41 (Tab. 1). Bei niederschlagsabhängigen Quellaustritten sind die pH-Werte einer stärkeren Schwankung unterworfen (vgl. oben). Bei diesen ist infolge von Niederschlägen eine Erniedrigung des pH-Wertes zu verzeichnen. Eine Verschiebung des pH-Wertes zum alkalischen Bereich war bei den Untersuchungen vor allem durch den Einfluß von Oberflächenfaktoren (Mineraldünger, Fäkalien) zu erkennen (Abb. 6). Der errechnete mittlere pH-Wert von 7,45 verleiht den Wässern des Unteren Keupers einen allgemein schwach alkalischen Charakter.

Sauerstoffsättigung

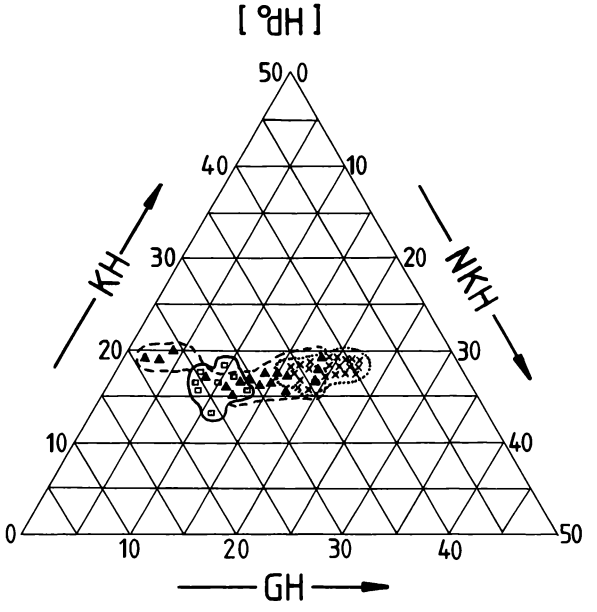
Die O_2-Sättigung der Quellwässer des Unteren Keupers variiert bei Werten zwischen 4,5 mg/l und 12,8 mg/l mit entsprechenden Sättigungswerten von 39 % und 115 % in sehr weiten Grenzen. Der Durchschnittswert der O_2-Konzentration liegt bei 9,0 mg/l und der entsprechenden O_2-Sättigung von 79 % (Tab. 1). Es ist festzustellen, daß die eindringenden, sauerstoffhaltigen Niederschlagswässer nur bei den geringmächtigen Deckschichten der Grundwasservorkommen sehr



Keuper + Quartär

○ q

● ku



Muschelkalk

▲ mo

× mm

□ mu

Abb.8: Härtediagramme der Muschelkalk-, Keuper- und Quartärwässer

wenig von ihrem Sauerstoffgehalt verlieren. Die Quellwässer weisen somit nach starken Niederschlägen häufig eine O_2-Sättigung auf.

Härte

Wie aus dem Härtediagramm hervorgeht (Abb. 8), schwankt die Härte der Quellwässer des Unteren Keupers untereinander relativ wenig. Die Werte der Gesamthärte streuen überwiegend zwischen 25 °dH und 30 °dH, die der Karbonathärte zwischen 15 °dH und 20 °dH und die der Nichtkarbonathärte zwischen 8 °dH und 15 °dH. Ausnahmen bilden Quellen mit geringen Aquifermächtigkeiten. Die Streuung der Härtewerte ist hier grundsätzlich auf Verdünnungseffekte durch eindringende Niederschläge zurückzuführen. Eine künstliche Beeinflusssung (Düngung) ist ebenfalls denkbar. Alle untersuchten Quellwässer des Unteren Keupers sind als "harte Wässer" zu bezeichnen.

Hauptbestandtteile

Kationen

Auf der Kationenseite beherrschen die Erdalkalien Ca^{++} und Mg^{++} im Durchschnitt mit rund 92 mval-% die Ionenverteilung (Abb. 9). Die Konzentrationswerte für Ca^{++} schwanken von 98,0 mg/l bis 150,3 mg/l. Der Durchschnittswert liegt bei 127,6 mg/l. Die Mg^{++}-Konzentrationswerte liegen zwischen 26,0 mg/l und 66,0 mg/l. Der Mittelwert beträgt 43,1 mg/l (Tab. 1). Als Ca^{++}- und Mg^{++}-Lieferanten kommen vorwiegend die kalkigen und dolomitischen Einschaltungen des Unteren Keupers in Betracht.

Die Alkalien (Na^+ und K^+) erreichen bei der Kationenverteilung einen Durchschnittswert von ca. 8 mval-% (Abb. 9) und treten somit stark in Hintergrund.

Die Na^+-Werte schwanken von 5,0 mg/l bis 21,9 mg/l. Der Mittelwert beträgt 8,6 mg/l. Die K^+-Werte liegen zwischen 0,3 mg/l und 8,0 mg/l. Der Durchschnittswert liegt bei 2,1 mg/l (Tab. 1). Beide Elemente sind durch erhebliche Schwankungen ihrer Konzentrations-

höhe gekennzeichnet, so daß eher eine anthropogene als geogene Belastung zu vermuten ist.

Vergleichsweise hohe Alkaligehalte sind im wesentlichen durch die Einflüsse aus den intensiv landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten bedingt.

Die relativ niedrigen Absolutgehalte im Vergleich zu den Erdalkalien hängen damit zusammen, daß durch die Kationenaustauschvorgänge eine Na^+-Adsorption und K^+-Fixierung auftreten kann (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1970).

Anionen

Unter den Anionen dominiert eindeutig das HCO_3^--Ion mit 60 mval-% bis 70 mval-% (Abb. 9). Seine Konzentrationswerte schwanken zwischen 280,6 mg/l und 485,0 mg/l. Der Mittelwert beträgt 382,5 mg/l (Tab. 1). Die Höhe des HCO_3^--Gehaltes hängt direkt von der pflanzlich und bakteriell im Boden entstehenden CO_2-Menge und dem Vorhandensein von Karbonatgesteinen ab. Im Unteren Keuper ist aufgrund der zwischengelagerten kalk- und dolomithaltigen Horizonte ein reichlicher Kalkgehalt vorhanden. Der relativ niedrige HCO_3^--Gehalt, der überwiegend bei den oberflächennahen Quellvorkommen auftritt, ist sehr wahrscheinlich auf Verdünnungseffekte zurückzuführen.

Die Cl^--Gehalte der Quellwässer des Unteren Keupers schwanken zwischen 44,0 mg/l und 137,0 mg/l. Der Mittelwert beträgt 77,8 mg/l (Tab. 1). Bei normalen unbeeinflußten Grundwässer liegt der Cl^--Gehalt bei 10 mg/l bis 30 mg/l (HÖLL 1979). Die Herkunft des Cl^--Ions hängt in erster Linie mit der geochemischen Häufigkeitsverteilung zusammen. Oberflächenfaktoren (z. B. Düngung, Streusalz) können jedoch den Cl^--Gehalt des Grundwassers erheblich beeinflussen (MATTHESS 1973); letzteres trifft auch hier zu.

Eine SO_4^{--}-Anreicherung im Grundwasser kann sowohl auf geologische als auch biologisch-biochemische Ursachen zurückgeführt werden. Als geologisch bedingte Ursachen kommen vor allem die Auslaugungsvorgänge SO_4^{--}-haltiger Gesteine in Betracht. Ferner kann eine

Freisetzung des SO_4^{--} durch die Tätigkeiten von Mikroorganismen in der belebten Bodenzone erfolgen und mit Hilfe der eindringenden Niederschläge das Grundwasser anreichern (MATTHESS 1973). Eine $SO4^{--}$-Erhöhung im Grundwasser kann ebenfalls durch die Auslösung der Mineraldünger hervorgerufen werden, da die meisten Sulfate relativ leicht wasserlöslich sind (KANZ 1977).

Die SO_4^{--}-Gehalte der Quellwässer des Unteren Keupers schwanken zwischen 13,7 mg/l und 100,0 mg/l. Die mittlere SO_4^{--}-Konzentration beträgt 48,9 mg/l (Tab. 1). Der prozentuale Anteil des SO_4^{--} im Anionendreieck schwankt zwischen 5 mval-% und 15 mval-% (Abb. 9).

Von den Anionen stellt NO_3^- eine der empfindlichsten Verbindungen dar, das auf chemische, physikalische und biologische Veränderungen der Umgebung reagiert. Nach HÖLL (1979) beträgt die geogene Grundlast ca. 10 mg/l.

Bei den untersuchten Quellen des Unteren Keupers wurden NO_3^--Konzentrationswerte festgestellt, die zwischen 3,0 mg/l und 118,0 mg/l (Mittelwert 51,8 mg/l) schwanken. Die höchsten NO_3^--Konzentrationswerte weisen solche Quellen auf, deren Einzugsgebiete intensiv landwirtschaftlich genutzt werden und deren Grundwasserleiter über wenig wirksame Deckschichten verfügt. Das NO_3^--Maximum tritt bei den meisten Quellen überwiegend im Winterhalbjahr auf. Die Hälfte aller Quellen des Unteren Keupers weisen NO_3^--Gehalte auf, die die 50 mg/l-EG-Grenze übersteigen.

Typisierung

Die im Untersuchungsgebiet austretenden Quellwässer des Unteren Keupers gehören zu den normalen erdalkalischen Wässern. Diese sind überwiegend hydrogenkarbonatische und zum Teil hydrogenkarbonatisch-sulfatische Wässer:

- $Ca\text{-}Mg\text{-}HCO_3$,
- $Ca\text{-}Mg\text{-}HCO_3\text{-}SO_4$

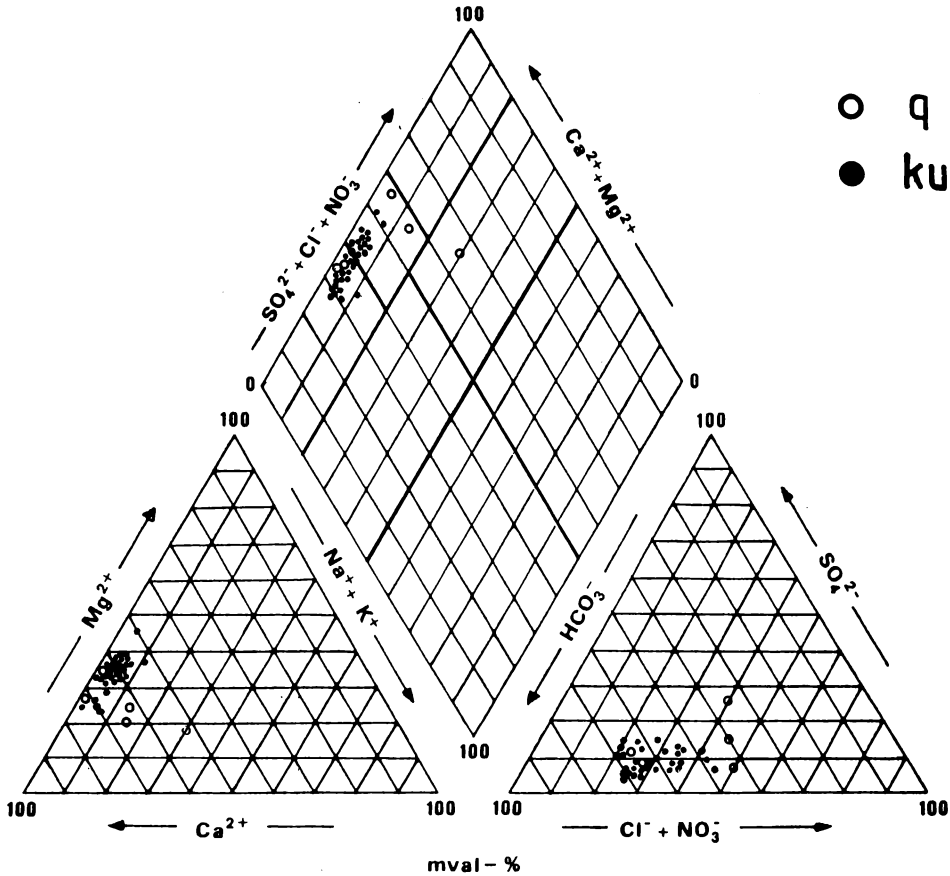


Abb.9: Prozentuale Zusammensetzung der Quellwässer des Unteren Keupers und Quartärs

Nebenbestandteile

Die untersuchten Stickstoffverbindungen NH_4^+ und NO_2^- stellen die wichtigsten Verschmutzungsindikatoren für das Grundwasser dar. Beide Verbindungen weisen bei gleichzeitigem Vorhandensein von NO_3^-, HPO_4^{--} und erhöhtem $KMnO_4$-Verbrauch auf eine eindeutig anthropogen bedingte Verschmutzung hin.

Etwa 60 % der untersuchten Quellen des Unteren Keupers zeigen keine nachweisbaren Mengen von NH_4^+ (Nachweisgrenze 0,01 mg/l). Der restliche Teil von 40 % der untersuchten Quellen weist NH_4^+-Konzentrationen, die zwischen 0,01mg/l und 0,45 mg/l liegen.

Auch NO_2^--Spuren wurden bei 16 % der untersuchten Quellen des Unteren Keupers festgestellt. Die Anwesenheit dieser Verbindung bestätigt ebenfalls, wie die o. g. Verschmutzungsindikatoren, daß eine Beeinträchtigung der betroffenen Quellen durch Oberflächenfaktoren vorliegt.

Der HPO_4^{--} gilt ebenso, wie NH_4^+, NO_3^-, NO_2^-, K^+ und Cl^- als ein wesentlicher Indikator für anthropogene Einflüsse auf das Grundwasser. Zu den wichtigsten HPO_4^{--}-Lieferanten zählen die häuslichen Abwässer, Stallmist, Jauche und Dünger. Erhöhte HPO_4^{--}-Gehalte zeigen meistens die Quellen, deren Einzugsgebiete landwirtschaftlich genutzt werden. Der HPO_4^{--}-Gehalt der Quellen des Unteren Keupers liegt zwischen 0,1 mg/l und 0,8 mg/l (Mittelwert 0,1 mg/l (Tab. 1)). Normale unbeeinflußte Grundwässer weisen eine HPO_4^{--}-Konzentration auf, die äußerst gering ist und meistens unter 0,1 mg/l liegt (HÖLL 1979).

Der SiO_2-Gehalt der Quellen des Unteren Keupers schwankt zwischen 5,4 mg/l und 36,8 mg/l (Mittelwert 18,0 mg/l (Tab. 1)). Natürliche Grundwässer enthalten SiO_2-Konzentrationen, die zwischen 1 mg/l und 30 mg/l liegen (MATTHESS 1973).

Organische Belastung ($KMnO_4$-Verbrauch)

Der $KMnO_4$-Verbrauch stellt das Maß für die Menge an oxidierbaren Substanzen eines Grundwassers dar. Unbelastete Grundwässer weisen einen sehr geringen $KMnO_4$-Verbrauch von gewöhnlich 3 mg/l bis 6 mg/l auf. Bei Verunreinigung des Grundwassers treten Erhöhungen des $KMnO_4$-Verbrauches bis zu über 60 mg/l auf (HÖLL 1979).

Die Quellwässer des Unteren Keupers zeigen einen Schwankungsbereich des $KMnO_4$-Verbrauchswertes von 1,6 mg/l bis 8,0 mg/l (Mittelwert 4,8 mg/l). Nur eine Quelle Q:70 (Abb. 5) weist einen höheren $KMnO_4$-Verbrauch von 13,5 mg/l auf (Tab. 1). Daraus ist abzuleiten, daß bei den untersuchten Quellwässern eine leichte bis mäßige organische Belastung vorliegt.

5.2.2 Quellwässer des Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalkes

Schüttung

Die Quellaustritte des Oberen Muschelkalkes sind im Untersuchungsgebiet grundsätzlich Schichtquellen. Ihre Schüttung schwankt zwischen 0,02 l/s und 4,0 l/s (Mittelwert 0,6 l/s (Tab. 1)). Die Quellen, deren Einzugsgebiete im Ton-Kalksteinfazies-Bereich liegen, z. B. Q:1, Q:6, Q:87, Q:89 und Q:92 weisen niedrigere Schüttungsmengen auf, als die Quellen des Quaderkalkfazies-Bereiches (Q:2 und Q:8 (Abb. 5)).

Die einzigen Quellen des Mittleren Muschelkalkes im Untersuchungsgebiet sind die Würzburger Bahnhofsquellen Q_a, Q_b, Q_c und Q_d (Abb. 5). Die Quelle Q_a besitzt die höchste Quellschüttung. Das geförderte Quellwasser deckt einen Teil des Wasserbedarfes der Stadt Würzburg. Die gemeinsame Schüttung der Quellen Q_a und Q_b zeigte im hydrogeologischen Jahr 1983 eine Schwankung zwischen 105 l/s und 158 l/s (Abb. 6). Die Schüttungsmaxima treten im Untersuchungszeitraum in den Sommermonaten auf, während die Schüttungsminima auf die Wintermonate fallen. Ihr Schüttungsverhalten, vergleichbar mit dem von Karstquellen, hängt einerseits von der Speicherwirkung des Aquifers, andererseits von der jährlichen Grundwasserneubildung ab.

Die Quellen des Unteren Muschelkalkes sind zum Teil Schichtquellen, die durch ihre geringe Schüttung und Schüttungsschwankung gekennzeichnet sind (Abb. 6). Diese versiegen meist in der trockenen Jahreszeit. Quellen in stärker tektonisch beanspruchten (geklüfteten) Gebirgsbereichen weisen in der Regel höhere Schüttungen und unter dem Einfluß der Niederschlagsereignisse breitere Schüttungsschwankungen auf (Tab.1). Die Niederschlagswässer können hier relativ ungehindert in Klüften und Spalten des Gebirges versickern und das Schüttungsverhalten der Quellen kurzfristig beeinflussen.

Temperatur

Die Wassertemperaturwerte der Quellen des Oberen und Unteren Muschelkalkes sind im Gegensatz zu denen der Quellen des Mittleren Muschelkalkes (Bahnhofsquellen) durch relativ breite Schwankungsbereiche gekennzeichnet. Die Quellen des Oberen und Unteren Muschelkalkes weisen Temperaturwerte auf, die zwischen 7,0 °C und 8,2 °C (Mittelwert 7,7 °C) bzw. 7,3 °C und 11,2 °C (Mittelwert 9,8 °C) liegen (Tab. 1). Die Temperaturwerte der Quellwässer des Mittleren Muschelkalkes schwanken weniger stark zwischen 11,4 °C und 12,7 °C (Mittelwert 12,0 °C). Die unterschiedlichen Schwankungsbreiten stehen sehr wahrscheinlich in Abhängigkeit zu den Aquifermächtigkeiten und der Verweildauer des Quellwassers im Untergrund.

Eine Phasenverschiebung bis zu 6 Monaten ist bei den Bahnhofsquellen ersichtlich (Abb. 6). Ferner deuten das ruhige und ausgeglichene Verhalten der Temperaturganglinien dieser Quellen auf eine lange Verweildauer des Grundwassers im Untergrund hin, so daß sich dieses allmählich der Temperatur des Gesteins angleicht.

Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit der Muschelkalkquellen schwankt im Vergleich zu den Quellen des Unteren Keupers und Quartärs weniger stark (Abb. 6). Die Quellen des Oberen und Unteren Muschelkalkes weisen im Vergleich zu den Quellen des Mittleren Muschelkalkes relativ niedrige Werte auf. Diese liegen bei den Quellen des Oberen Muschelkalkes bei 660 μS/cm bis 1120 μS/cm (Mittelwert 910 S/cm),

bei den Quellen des Mittleren Muschelkalkes bei 960 µS/cm bis 1270 µS/cm (Mittelwert 1100 µS/cm) und bei den Quellen des Unteren Muschelkalkes bei 680 µS/cm bis 910 µS/cm (Mittelwert 770 µS/cm (Tab. 1)).

Eine Beeinflussung der Quellen durch Oberflächenfaktoren, vor allem durch Erhöhung des Na^+- und Cl^--Gehaltes (infolge Salzstreuung und Mineraldünger) macht sich durch kurzfristige Erhöhung des Leitfähigkeitswertes bemerkbar.

pH-Wert

Die pH-Werte der Quellen des Oberen Muschelkalkes weisen im Vergleich zu den Quellen des Mittleren und Unteren Muschelkalkes einen relativ breiten Schwankungsbereich auf. Die Quellen des Oberen Muschelkalkes zeigen pH-Werte, die zwischen 7,00 und 8,40 (Mittelwert 7,66) liegen. Die Werte der Quellen des Mittleren und Unteren Muschelkalkes streuen im Bereich von 6,54 bis 7,54 (Mittelwert 7,00) bzw. von 7,03 bis 7,73 (Mittelwert 7,35 (Tab.1)). Damit liegen sie im schwach saueren bzw. schwach alkalischen Bereich.

Aus der Abbildung 6 geht hervor, daß mit zunehmender Schüttung eine Abnahme der Alkalität einhergeht.

Sauerstoffsättigung

Die gemessenen O_2-Gehalte bei den Muschelkalkquellen des Untersuchungsgebietes schwanken zwischen 3,4 mg/l und 12,6 mg/l. Die niedrigsten O_2-Sättigungswerte mit einer geringen Schwankungsbreite zwischen 32 Sätt.% und 88 Sätt.% (Mittelwert 53 Sätt.%) weisen die Bahnhofsquellen auf (Tab. 1). Dies ist vermutlich auf die abdichtende Wirkung der überlagernden Deckschichten ihrer Einzugsgebiete zurückzuführen.

Die Quellen des Oberen Muschelkalkes zeigen eine relativ starke Schwankung, die zwischen 6,0 mg/l und 12,6 mg/l (Mittelwert 9,6 mg/l) liegt. Dies entspricht einer O_2-Sättigung von 51 Sätt.% (Mittelwert 85 Sätt.%). Die auftretende Übersättigung steht sehr wahrscheinlich mit der Klüftigkeit des Gebirges in Zusammenhang, infolgedes-

sen die O_2-haltigen Niederschlagswässer ohne wirksame Verzögerung ins Grundwasser eindringen können.

Härte

Aus dem Härtediagramm (Abb. 8) wird ersichtlich, daß die aus der Muschelkalkformation austretenden Quellwässer im allgemeinen einen relativ harten bis sehr harten Charakter aufweisen. Dies ist auf die petrographische Zusammensetzung des Muschelkalkaquifers zurückzuführen, in dem das Lösungsangebot an Ca^{++} und Mg^{++} (Härtebildner) reichlich vorhanden ist. Die auftretenden Härteunterschiede können durch das unterschiedlich hohe CO_2-Angebot der Deckschichten und der Verdünnungseffekte erklärt werden.

Die Werte der Gesamthärte streuen von ca. 21 °dH bis ca. 41 °dH. Die niedrigste Gesamthärte (Schwankungsbereich 24,4 °dH bis 27,6 °dH, Mittelwert 25,9 °dH) zeigen die Quellwässer des Unteren Muschelkalkes. Die höchste Gesamthärte (Schwankungsbereich 34,1 °dH bis 41,5 °dH, Mittelwert 37,4 °dH) weisen die Quellwässer des Mittleren Muschelkalkes (Bahnhofsquellen) auf. Eine intermediäre Stellung nehmen die Quellen des Oberen Muschelkalkes (Schwankungsbereich 21,2 °dH bis 37,9 °dH, Mittelwert 30,0 °dH (Tab. 1)) ein.

Von der Gesamthärte entfällt bei den Quellen des Oberen und Unteren Muschelkalkes 58 % bzw. 60 %, bei den Quellen des Mittleren Muschelkalkes 48 % auf die Karbonathärte. Diese schwankt zwischen 12,9 °dH und 20,0 °dH (Tab. 1).

Der erhöhte Anteil an Nichtkarbonathärte (Schwankungsbereich 8,3 °dH bis 22,5 °dH) ist durch die hohen Gehalte an Sulfat (Gipshärte) bedingt (Tab. 1).

Hauptbestandteile

Kationen

Bei den Quellwässern des Muschelkalkes dominieren unter den Kationen erwartungsgemäß eindeutig die Erdalkalien (Ca^{++} und Mg^{++}). Diese nehmen bei der Kationenverteilung einen durchschnittlichen

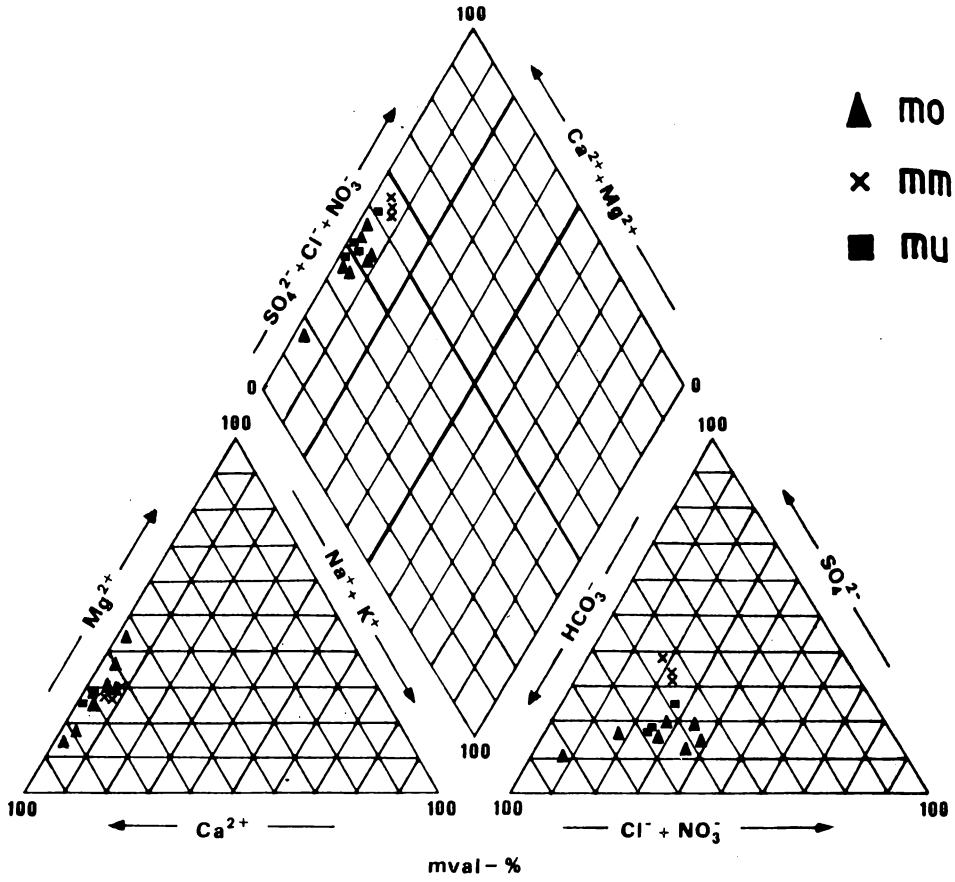


Abb.10: Prozentuale Zusammensetzung der Quellwässer des Muschelkalkes

Anteil von 95 % ein (Abb. 10). Die Ca^{++}-Gehalte der Muschelkalkquellen streuen von 110,0 mg/l bis 207,5 mg/l. Der Durchschnittswert bei den Quellen des Oberen Muschelkalkes liegt bei 146,8 mg/l, bei den Quellen des Mittleren Muschelkalkes bei 185,4 mg/l und bei den Quellen des Unteren Muschelkalkes bei 135,0 mg/l (Tab. 1).

Die Mg^{++}-Konzentrationswerte der Muschelkalkwässer schwanken zwischen 14,0 mg/l und 72,0 mg/l (Tab. 1). Der durchschnittliche Mg^{++}-Gehalt bei den Quellen des Oberen Muschelkalkes beträgt 40,0 mg/l, bei den Quellen des Mittleren Muschelkalkes 51,2 mg/l und bei den Quellen des Unteren Muschelkalkes 31,1 mg/l (Tab. 1).

Wesentliche Ca^{++}- und Mg^{++}-Lieferanten sind die Karbonat- und Dolomitgesteine sowie die Salzgesteine der Salinarregion des Muschelkalkaquifers.

Die unterschiedlichen Ca^{++}-Konzentrationswerte sind vermutlich auf die verschieden hohe CO_2-Zufuhr zurückzuführen. Auch Ionenaustauschvorgänge können den Ca^{++}-Gehalt erheblich beeinflussen. Die Mg^{++}-reichen Mineraldünger (Dolomitmehl) können ebenfalls zu einer Beeinträchtigung des Grundwassers beitragen.

Die Alkalien der Muschelkalkquellwässer des Untersuchungsgebietes erreichen bei der Kationenverteilung ca. 5 mval-% (Abb. 10). Der Na^{+}-Gehalt bewegt sich zwischen 3,7 mg/l und 25,5 mg/l während das K^{+} mit noch geringeren Konzentrationswerten zwischen 1,0 mg/l und 8,0 mg/l vertreten ist (Tab. 1).

Anionen

Auf der Anionenseite überwiegt aufgrund des reichlich vorhandenen Kalkgehaltes das HCO_3^{-}-Ion mit 45 bis 60 mval-% (Abb. 10). Die HCO_3^{-}-Konzentrationswerte bei den Quellen des Oberen Muschelkalkes schwanken zwischen 308,7 mg/l und 433,1 mg/l (Mittelwert 380,1 mg/l), bei den Quellen des Mittleren Muschelkalkes (Bahnhofsquellen) zwischen 366,0 mg/l und 427,0 mg/l (Mittelwert 389,9 mg/l) und bei den Quellen des Unteren Muschelkalkes 280,6 mg/l und 366,0 mg/l (Mittelwert 339,3 mg/l (Tab. 1)). Überwiegend die oberflächennahen Quellvorkommen des Oberen und Unteren Muschelkalkes sind durch

erhebliche Schwankungen des HCO_3^--Gehaltes gekennzeichnet. Dies ist vermutlich auf Verdünnungseffekte zurückzuführen.

Die Cl^--Gehalte weisen einen Schwankungsbereich von 16,0 mg/l bis 132,0 mg/l auf. Die mittlere Cl^--Konzentration in den Quellwässern des Oberen Muschelkalkes beträgt 76,4 mg/l, in den Quellwässern des Mittleren Muschelkalkes 71,5 mg/l und in den Quellwässern des Unteren Muschelkalkes 43,5 mg/l (Tab. 1). Dieser relativ breite Schwankungsbereich deutet auf eine Beeinflussung des Grundwassers hin, die überwiegend anthropogen bedingt ist (häusliche Abwässer, Streusalze, Düngermittel).

Die SO_4^{--}-Konzentration der Quellwässer aus dem Muschelkalkaquifer des Untersuchungsgebietes weisen eine deutliche Differenzierung auf. Während die SO_4^{--}-Gehalte der Quellen des Oberen und Unteren Muschelkalkes zwischen 27,4 mg/l und 148,0 mg/l schwanken und einen Durchschnittswert von 81,8 mg/l bzw. von 71,6 mg/l aufweisen, liegen die SO_4^{--}-Konzentrationen der Quellen aus dem Mittleren Muschelkalk (Bahnhofsquellen) zwischen 168,0 mg/l und 306,0 mg/l. Der Mittelwert beträgt 237,0 mg/l (Tab. 1). Die Beeinflussung durch geologische Faktoren besitzt hier repräsentative Aussagekraft. Die wichtigsten SO_4^{--}-Lieferanten sind die Gips- und Anhydritgesteine dieses Grundwasserleiters.

Die NO_3^--Gehalte der Muschelkalkquellen des Untersuchungsgebietes schwanken mit Konzentrationswerten von 7,5 mg/l bis 118,0 mg/l in weiten Grenzen und deuten auf eine Beeinträchtigung des Gurndwassers durch Oberflächenfaktoren hin.

Aus den Untersuchungen geht hervor, daß die Würzburger Bahnhofsquellen die bisherigen Auffassungen ULBRICHs (1957) und EBHARDTs (1978, 1981) bezüglich einer zunehmenden Tendenz bei den Cl^-- und NO_3^--Gehalten bestätigt haben. Während die mittlere Cl^-- und NO_3^--Konzentration in dem Zeitraum 1945/50 bei 33,0 mg/l bzw. 24,0 mg/l und in dem Zeitraum 1970/75 bei 43,0 mg/l bzw. 32,0 mg/l lagen, wurde im hydrogeologischen Jahr 1982/83 ein mittlerer Cl^-- und NO_3^--Gehalt von 71,5 mg/l bzw. 54,8 mg/l (Mittelwerte der Quellen Q_a, Q_b und Q_c) ermittelt.

Typisierung

Die im Untersuchungsgebiet auftretenden Quellwässer aus den dort ausgebildeten Grundwasserleitern des Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalkes gehören zu den normalen erdalkalischen Wässern. Diese sind zum Teil hydrogenkarbonatische und überwiegend hydrogenkarbonatisch-sulfatische Wässer:

$Ca\text{-}Mg\text{-}HCO_3$ (Cl) Wässer des Oberen und Unteren Muschelkalkes

$Ca\text{-}Mg\text{-}HCO_3\text{-}SO_4$ Wässer des Mittleren Muschelkalkes

Nebenbestandteile

Bei den Muschelkalkwässern wurden geringe, zwischen 0,01 mg/l und 0,35 mg/l liegende NH_4^+-Konzentrationen festgestellt. Die höchsten Gehalte weisen die Quellen des Mittleren Muschelkalkes (Würzburger Bahnhofsquellen (Tab. 1) auf.

Die HPO_4^{--}-Gehalte schwanken zwischen 0,01 mg/l und 0,32 mg/l (Tab. 1). Sowohl die Würzburger Bahnhofsquellen als auch einige oberflächennahe Quellwasservorkommen des Oberen und Unteren Muschelkalkes sind durch erhöhte HPO_4^{--}-Konzentrationen (über 0,2 mg/l) gekennzeichnet. Die gemessenen HPO_4^{--}-Gehalte deuten auf eine anthropogene Beeinträchtigung des Grundwassers hin.

Der SiO_2-Gehalt weist bei den untersuchten Muschelkalkquellen des Arbeitsgebietes Konzentrationswerte auf, die von 8,1 mg/l bis 28,5 mg/l schwanken. Im Durchschnitt bewegen sich die Werte von 16,5 mg/l bis 18,0 mg/l und übersteigen die SiO_2-Gehaltsgrenze (30 mg/l) der natürlichen Grundwässer nicht. Das Auftreten von SiO_2 in den Muschelkalkwässern ist überwiegend auf die leichte Löslichkeit der amorphen Kieselsäure zurückzuführen, die in den Kalksteinen des Muschelkalkes vorhanden ist.

Organische Belastung ($KMnO_4$-Verbrauch)

Die Durchschnittswerte des $KMnO_4$-Verbrauches bei den Quellen des Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalkes liegen bei 5,1 mg/l, 3,1 mg/l bzw. 4,4 mg/l (Tab. 1). Somit lassen sie keine nennenswerte Beeinträchtigung der Muschelkalkquellen durch organische Substanzen erkennen.

5.2.3 Quellwässer des Quartärs

Schüttung

Die Quartärquellen zeigen in der Regel ein ähnliches Verhalten, wie die Quellen des Unteren Keupers. Ihre Einzugsgebiete sind bei geringmächtigen Grundwasserleitern auch flächenmäßig relativ klein. Sie sind durch geringe zwischen 0,02 l/s und 3,8 l/s schwankende Schüttungen gekennzeichnet (Tab. 1). Die meisten oberflächennahen Quartärquellen versiegen in der trockenen Jahreszeit.

Temperatur

Bei der Wassertemperatur der Quartärquellen wurden erhebliche Schwankungen festgestellt (6,6 °C bis 15,3 °C (Tab. 1)). Sie zeigen einen vom Jahresgang der Lufttemperatur stark abhängigen Verlauf (Abb. 6).

Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit der Quartärquellen liegt zwischen 273 μS/cm und 1202 μS/cm, durchschnittlich bei 730 μS/cm (Tab. 1), wobei die niedrigen Werte starke Verdünnungseffekte durch Oberflächenwässer erkennen lassen.

pH-Wert

Der pH-Wert der Quartärquellen bewegt sich zwischen 6,85 und 7,85, der Mittelwert liegt bei 7,3 (Tab. 1). Somit weisen die Quartärquellen

im allgemeinen einen neutralen bis schwach alkalischen Charakter auf.

Sauerstoffsättigung

Der O_2-Gehalt in den Quellwässern des Quartärs schwankt zwischen 5,2 mg/l bis 12,9 mg/l. Dies entspricht einer O_2-Sättigung von 40 Sätt.% bzw. 117 Sätt.% (Tab. 1).

Härte

Die Werte der Gesamthärte streuen zwischen 7,1 °dH und 35,9 °dH, die der Karbonathärte zwischen 3,4 °dH und 23,1 °dH (Tab. 1). Anhand der Werte läßt sich sowohl der Einfluß von Oberflächenwässern, wie auch aus der intensiven Düngung erkennen. Alle Quellwässer des Quartärs im Untersuchungsgebiet sind als hart zu bezeichnen.

Hauptbestandteile

Kationen

Die Erdalkalien (Ca^{++} und Mg^{++}) sind bei den untersuchten Quellen des Quartärs die wesentlichen Bestandteile unter den Kationen. Die Ca^{++}-Gehalte schwanken zwischen 37,0 mg/l und 184,0 mg/l (Mittelwert 114,6 mg/l). Die Mg^{++}-Konzentrationswerte liegen zwischen 8,0 mg/l und 52,0 mg/l (Mittelwert 29,3 mg/l (Tab. 1)). In der Ionenverteilung erreichen beide Elemente einen Anteil von 70 mval-% bis 95 mval-% (Abb. 9).

Die Alkalien (Na^+ und K^+) sind in der Kationenverteilung mit einem Anteil von 5 mval-% bis 30 mval-% vertreten. Die Na^+-Gehaltswerte schwanken zwischen 4,8 mg/l und 40,5 mg/l (Mittelwert 15,0 mg/l). Die K^+-Konzentrationen sind erheblich niedrig und liegen zwischen 0,8 mg/l und 2,5 mg/l (Mittelwert 1,2 mg/l). Der relativ breite Schwankungsbereich beider Elemente ist sehr wahrscheinlich auf die Verdünnungseffekte und auf die anthropogen bedingte Beeinflussung zurückzuführen.

Anionen

Wie aus der Abbildung 11 ersichtlich wird, bildet innerhalb der Anionen das HCO_3^--Ion den wesentlichen Bestandteil. Seine Konzentrationswerte liegen zwischen 73,2 mg/l und 503,3 mg/l (Mittelwert 279,3 mg/l (Tab. 1)). Wesentlicher Grund für den meist niedrigen HCO_3^--Gehalt ist vermutlich die geringe Aquifermächtigkeit sowie die Gesteinsausbildung der quartären Grundwasserleiter.

Die SO_4^{--}-Gehalte sind mit Werten zwischen 32,4 mg/l und 58,0 mg/l (Mittelwert 47,5 mg/l (Tab. 1)) aufgrund der petrographischen Zusammensetzung der Grundwasserleiter relativ niedrig.

Während die grundwasserbürtigen Ionen Ca^{++}, Mg^{++}, HCO_3^- und SO_4^{--} hauptsächlich von der Petrographie des Grundwasserleiters abhängig sind, können in den meisten Fällen die übrigen Komponenten, insbesondere Cl^-, NO_3^-, NH_4^+ und HPO_4^{--} bei vorliegenden hohen Konzentrationen anthropogenen Ursprungs sein. Es schwanken beispielsweise die Cl^-- Konzentrationen zwischen 44,0 mg/l und 168,0 mg/l (Mittelwert 77,7 mg/l). Die NO_3^--Gehalte liegen zwichen 11,5 mg/l und 121,5 mg/l (Mittelwert 56,2 mg/l (Tab. 1)).

Typisierung

Im Untersuchungsgebiet sind die Quellwässer des Quartärs (Löß, Lößlehmüberdeckung und Alluvionen) normale erdalkalische Wässer und gehören dem überwiegend hydrogenkarbonatisch-sulfatischen Typus an.

Nebenbestandteile

HPO_4^{--} und NH_4^+ treten in den meisten Quellwässsern des Quartärs auf. Ihre Konzentrationswerte liegen zwischen 0,08 mg/l und 0,11 mg/l bzw. zwischen 0,02 mg/l und 0,37 mg/l (Tab. 1). Sämtliche Quellen mit NH_4^+-Konzentrationen über 0,1 mg/l sind durch begleitende Verschmutzungsindikatoren, wie NO_3^-, Cl^- und HPO_4^{--} gekennzeichnet. Als Ursache für vergleichsweise hohe Konzentrationen kommen im wesentlichen anthropogen bedingte Beeinträchtigungen in Frage.

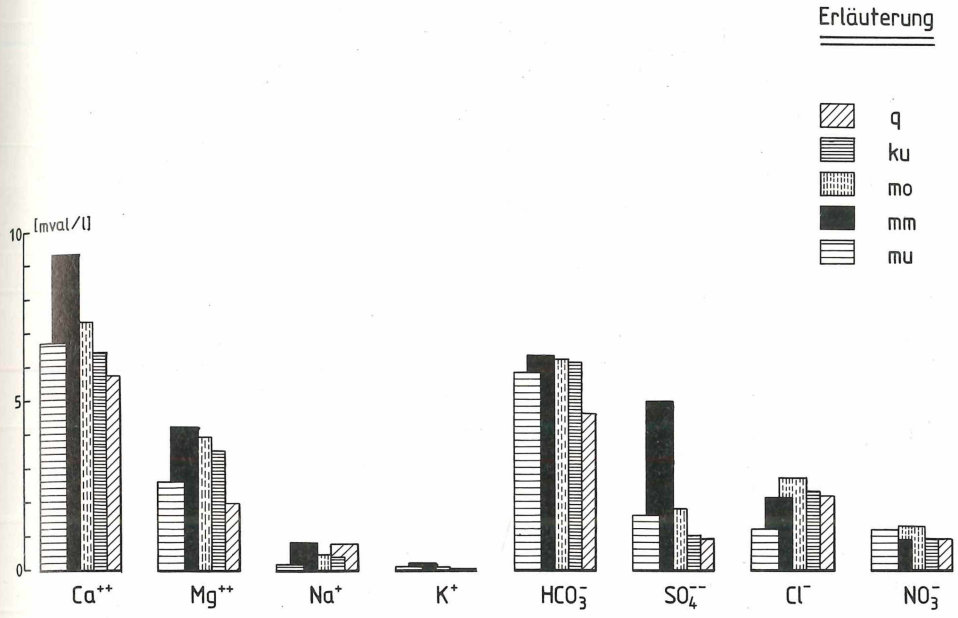


Abb. 11: Absolutgehalte der einzelnen Bestandteile der Quellwässer

Die SiO_2-Gehalte weisen Werte auf, die in einem Schwankungsbereich von 8,6 mg/l und 27,4 mg/l liegen der Mittelwert beträgt 15,5 mg/l (Tab. 1).

Organische Belastung ($KMnO_4$-Verbrauch)

Die Quartärquellen des Untersuchungsgebietes weisen $KMnO_4$-Verbrauch auf, dessen Werte sich von 3,2 mg/l bis 21,2 mg/l bewegen. Der Mittelwert liegt bei 8,3 mg/l (Tab. 1). Daraus läßt sich feststellen, daß hier eine leichte bis mäßige organische Belastung vorliegt.

6. Schlußfolgerungen

Im Rahmen der hydrogeologischen Untersuchungen im mittleren Bereich des Maindreiecks wurden nach einer systematischen Quellkartierung im Untersuchungsgebiet die physikalischen und chemischen Eigenschaften der einzelnen Grundwassertypen - je nach Gesteinsformation - dargestellt.

Am geologischen Aufbau des ca. 330 km^2 großen Untersuchungsgebietes sind im wesentlichen die mesozoischen Schichten des Unteren, Mittleren und Oberen Muschelkalkes sowie des Unteren Keupers beteiligt. Weite Flächen werden von quartären Löß- und Lößlehmüberdeckungen eingenommen. Die flachlagernden Schichten zeigen ein generelles Südost-Einfallen und sind von einer germanotypen Tektonik geprägt.

Die lithologische Zusammensetzung des Muschelkalkes bietet unterschiedliche Voraussetzungen für die Verkarstung. Die Gesteine des Mittleren Muschelkalkes sind besonders verkarstungsfähig und stellen einen seichten Halbkarst (Gipskarst) dar. Die Verkarstungsfähigkeit ist grundsätzlich auf die Auslaugungsvorgänge der Salzgesteine (Gips- und Anhydrit) zurückzuführen.

Den wichtigsten Grundwasserleiter stellen die Gesteine des Mittleren und Oberen Muschelkalkes dar. Ein nennenswerter Wasserspeicher ist

ebenfalls der Werksandstein des Unteren Keupers, wenn dieser mächtig ausgebildet ist.

Die Quellwässer der drei Muschelkalkformationen, des Lettenkeupers und des Quartärs zeigen bezüglich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften deutliche Unterschiede.

Quellen des Quartärs und des Unteren Keupers, die aus einem engräumigen, meist oberflächennahen, schnell auslaufenden Aquifer gespeist werden, zeichnen sich durch extreme Schüttungsschwankungen aus und versiegen in der trockenen Jahreszeit sehr schnell. Diese weisen eine große Streuung der Konzentrationswerte ihrer gelösten Ionen auf. Dagegen sind Quellen mit einem größeren, zusammenhängenden und tieferliegenden Aquifer durch ein ruhiges Schüttungsverhalten und geringere Veränderungen ihrer physikalischen und chemischen Parameter gekennzeichnet.

Die im Untersuchungsgebiet austretenden Quellwässer des Quartärs und Unteren Keupers zeigen einen mittleren Gesamtmineralgehalt von 636 mg/l bzw. 762 mg/l, einen schwach alkalischen Charakter und gehören dem normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen und zum Teil hydrogenkarbonatisch-sulfatischen Wassertypus an.

Die Quellwässer des Oberen und Unteren Muschelkalkes weisen in ihrem Schüttungsverhalten Verzögerungen mit meist breiteren und überwiegend niedrigeren Amplituden auf. Diese werden entsprechend der karbonatischen Gesteinsausbildung den normal erdalkalischen, überwiegend hydrogenkarbonatischen und teilweise hydrogenkarbonatisch-sulfatischen Wässern zugeordnet. Der Gesamtmineralgehalt der Quellvorkommen aus dem Oberen und Unteren Muschelkalk beträgt im Durchschnitt 827 mg/l bzw. 728 mg/l.

Die Quellen des Mittleren Muschelkalkes (Würzburger Bahnhofsquellen) weisen ein Schüttungsverhalten auf, das der Karstquellen ähnlich ist. Das geförderte Wasser gehört entsprechend der Aquiferpetrographie dem normal erdalkalischen, hydrogenkarbonatisch-sulfatischen Wassertypus an. Dieses ist ein Mineralwasser mit einem mittleren

Tab. 1: Analysenwerte der untersuchten Quellwässer

		GRUNDWASSERLEITER				
		Unterer Muschelkalk	Mittlerer Muschelkalk	Oberer Muschelkalk	Keuper	Quartär
Anzahl der Analysen		7	36	23	91	13
Schüttung (l/s)	Schwank.:	0,3 - 17,0	107,0 - 158,0	0,02 - 4,0	0,05 - 6,0	0,02 - 3,8
	Mittelw.:	4,7	134,0	0,6	0,9	0,75
Temperatur (°C)	Schwank.:	7,3 - 11,2	11,4 - 12,7	7,0 - 8,2	6,5 - 12,3	6,6 - 15,3
	Mittelw.:	9,8	12,0	7,7	9,2	8,5
Leitfähigkeit (µS/cm)	Schwank.:	680 - 910	960 -1270	660 -1210	608 -1120	277 -1202
	Mittelw.:	770	1100	910	880	730
pH-Wert	Schwank.:	7,03- 7,73	6,54 - 7,54	7,00 - 8,40	6,81 - 8,41	6,85 - 7,85
	Mittelw.:	7,35	7,00	7,66	7,45	7,30
O_2-Gehalt (mg/l)	Schwank.:	6,1 - 10,1	3,4 - 8,5	6,0 - 12,6	4,5 - 12,8	5,2 - 12,9
	Mittelw.:	8,2	5,6	9,6	9,0	9,1
O_2-Sättigung (%)	Schwank.:	56 - 92	32 - 88	51 - 114	39 - 115	40 - 117
	Mittelw.:	72	53	85	79	81
Gesamthärte (°dH)	Schwank.:	24,4 - 27,6	34,1 - 41,5	21,2 - 37,9	23,0 - 34,1	7,1 - 35,9
	Mittelw.:	25,9	37,4	30,0	28,0	23,9
Karbonathärte (°dH)	Schwank.:	12,9 - 16,8	16,8 - 19,6	15,1 - 20,0	12,9 - 22,3	3,4 - 23,1
	Mittelw.:	15,4	17,9	17,5	17,6	13,0
Nichtkarbonathärte (°dH)	Schwank.:	8,3 - 11,8	16,9 - 22,5	8,6 - 20,0	5,5 - 15,6	3,7 - 18,5
	Mittelw.:	10,3	19,5	12,8	10,4	10,9
Ca^{++} (mg/l)	Schwank.:	125,0 - 148,0	160,0 - 207,5	110,0 - 182,0	98,0 - 150,3	37,0 - 184,0
	Mittelw.:	135,0	185,4	146,8	127,6	114,6
Mg^{++} (mg/l)	Schwank.:	30,0 - 35,0	50,2 - 52,8	14,0 - 72,0	26,0 - 66,0	8,0 - 52,0
	Mittelw.:	31,1	51,2	40,0	43,1	29,3
Na^{+} (mg/l)	Schwank.:	3,7 - 7,5	13,5 - 22,0	4,2 - 25,5	5,0 - 21,9	4,8 - 40,5
	Mittelw.:	5,6	18,0	11,6	8,6	15,1
K^{+} (mg/l)	Schwank.:	1,4 - 2,5	2,0 - 7,2	1,0 - 0,8	0,3 - 8,0	0,5 - 2,5
	Mittelw.:	1,9	4,5	2,8	2,1	1,2
NH_4^{+} (mg/l)	Schwank.:	nn - 0,07	nn - 0,35	nn - 0,04	nn - 0,45	nn - 0,37
	Mittelw.:	0,04	0,13	0,04	0,11	0,07
HCO_3^{-} (mg/l)	Schwank.:	280,6 - 366,0	366,0 - 487,0	308,7 - 433,1	280,6 - 485,0	73,2 - 503,3
	Mittelw.:	339,3	389,9	380,1	382,5	279,3
Cl^{-} (mg/l)	Schwank.:	30,0 - 52,0	68,0 - 79,0	16,0 - 132,0	44,0 - 137,2	44,0 - 168,0
	Mittelw.:	43,5	71,5	76,4	77,8	77,7
SO_4^{--} (mg/l)	Schwank.:	58,2 - 100,0	168,0 - 306,0	27,4 - 148,0	13,7 - 100,0	32,4 - 58,0
	Mittelw.:	76,1	237,0	81,8	48,9	47,4
NO_3^{-} (mg/l)	Schwank.:	45,0 - 112,5	28,7 - 77,0	7,5 - 118,0	3,0 - 118,0	11,5 - 121,5
	Mittelw.:	76,1	54,8	70,4	51,8	56,2
NO_2^{-} (mg/l)		+	-	+	+	+
HPO_4^{--} (mg/l)	Schwank.:	0,01 - 0,24	0,01 - 0,23	0,01 - 0,32	0,01 - 0,80	0,05 - 0,11
	Mittelw.:	0,11	0,08	0,11	0,12	0,02
SiO_2 (mg/l)	Schwank.:	11,7 - 24,2	12,4 - 28,0	8,1 - 28,5	5,4 - 36,8	8,6 - 27,4
	Mittelw.:	18,6	16,5	18,0	18,0	15,5
$KMnO_4$-Verbr. (mg/l)	Schwank.:	3,2 - 5,8	0,9 - 6,3	2,6 - 17,1	1,6 - 13,5	3,2 - 21,2
	Mittelw.:	9,4	3,1	5,1	4,8	8,3
Gesamtmineral-gehalt	Schwank.:	697 - 760	979 - 1070	669 - 1005	653 - 875	256 - 935
	Mittelw.:	728	1025	827	762	636

Gesamtmineralgehalt von 1025 mg/l und einer eindeutigen Ca-Mg-HCO_3-SO_4-Zusammensetzung.

Die Hauptbestandteile Ca^{++}, Mg^{++}, SO_4^{--} und HCO_3^- der Quellwasservorkommen des Untersuchungsgebietes sind überwiegend gesteinsbedingt. Dagegen äußert sich bei den nicht gesteinsspezifischen Ionen Na^+, K^+, Cl^-, NO_3^- und HPO_4^{--} der anthropogene Einfluß. Erhöhte Konzentrationswerte treten bei den Quellen auf, deren Einzugsgebiete intensiv landwirtschaftlich genutzt werden oder sich im Bereich von Siedlungen befinden.

7. Literaturverzeichnis

CARLÉ, W. (1955): Bau und Entwicklung der südwestdeutschen Großscholle. - Beih. Geol. Jb. 16, 272 S., Hannover.

CRAMER, P. (1964): Tektonik. - Erl. geol. Kt. Bayern 1:500 000, 69-81, München.

GEORGOTAS, N. & UDLUFT, P. (1978): Inhaltsstoffe des Oberflächenwassers. - "Das Mainprojekt", Schr.-R. Bayer. L.-Amt Wasserwirtschaft 7: 258-265, München.

GERB, L. (1958): Grundwassertypen. - Vom Wasser 25: 16-47, Weinheim.

HEIMBACH, W. (1958): Tektonische und gravitative Deformation in der Trias Unterfrankens. - Dissertation, 73 S., Universität Würzburg.

HEROLD, B. (1981): Erläuterungen zur geologischen Kartierung auf dem NE-Quadranten des Kartenblattes NR. 6126 Dettelbach. - Diplomarbeit (unveröff.) Univ. Würzburg.

HÖLL, K. (1979): Wasser - Untersuchung-Beurteilung-Aufbereitung-Chemie-Bakteriologie-Virologie-Biologie. - 515 S., Berlin, New York (Walter de Gruyter).

HOFFMANN, U. (1967a): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6225 Würzburg Süd. - 134 S., 17 Abb., 2 Tab., 4 Beil., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

HOFFMANN, U. (1967b): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6125 Würzburg Nord. - 94 S., 21 Abb., 1 Tab., 4 Beil., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

KANZ, W. (1977): Das Talgrundwasser des Maintals im Grenzbereich Muschelkalk-Buntsandstein - Hydrologie und Beschaffenheit, Dissertation, 118 S., 50 Abb., 16 Tab., Universität Tübingen.

KIRCHNER, A. (1934): Die saxonische Tektonik Unterfrankens und ihre Einwirkung auf die Morphologie und Flußgeschichte des Mains. - Abh. geol. Landesunters. Bayer. Oberbergamt, H. 12, München.

MATTHESS, G. (1973): Die Beschaffenheit des Grundwassers (Lehrbuch der Hydrogeologie. Band 2). - 324 S., 89 Abb., 86 Tab., Berlin-Stuttgart (Borntraeger).

RODA, B. v. (1984): Geologische Kartierung auf dem NW-Quadranten des Blattes 6126 Dettelbach der topographischen Karte 1:25 000 mit Erläuterungen nebst speziellen Untersuchungen an Glaukoniten aus dem Werksandstein. - Diplomarbeit (unveröff.) Univ. Würzburg.

RUTTE, E. (1957): Einführung in die Geologie von Unterfranken. - 152 S., Würzburg.

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1970): Lehrbuch der Bodenkunde - 473 S., 114 Abb., 1 Tab., Stuttgart (Enke).

SCHOLZ, P. (1982): Erläuterungen zur geologischen Kartierung auf dem SW-Quadranten des Kartenblattes Nr. 6126 Dettelbach. - Diplomarbeit (unveröff.), III + 80 S., 26 Abb., 4 Tab., 4 Taf., Univ. Würzburg.

STAMATIS, G. (1986): Hydrogeologische Untersuchungen im mittleren Bereich des Maindreiecks unter besonderer Berücksichtigung der Hydrochemie und der hydraulischen Zusammenhänge zwischen Talgrundwasser und Main im Stadtbereich Würzburg. - Dissertation, 270 S., 71 Abb., 39 Tab., Univ. Würzburg.

ULBRICH, R. (1952): Tektonik und Grundwasserführung in ihren Beziehungen zueinander aufgrund geologischer Aufnahmen in der Umgebung von Würzburg. - Dissertation, Geologica Bavarica 25: 51-89, München 1956.

Anschrift des Verfassers:
Dr. Georgios Stamatis, Semmelstr.46, 8700 Würzburg

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins Würzburg

Jahr/Year: 1989

Band/Volume: 30

Autor(en)/Author(s): Stamatis Georgios

Artikel/Article: Die chemische Beschaffenheit der Quellwässer im mittleren Bereich des Maindreiecks (Unterfranken/Südddeutschland) 247-291