

Die Hydrogeologie und Hydrochemie des Einzugsgebietes der obersten Donau

Von H. HÖTZL, Karlsruhe

Inhalt

1. Einleitung
 1. 1. Aufgabenstellung
 1. 2. Geographische Lage und Abgrenzung des Arbeitsgebietes
2. Geologischer Überblick
 2. 1. Schichtfolge und Gesteine
 2. 1. 1. Das Grundgebirge
 2. 1. 2. Das Mesozoikum
 2. 1. 3. Das Tertiär
 2. 1. 4. Das Quartär
 2. 2. Schichtlagerung und tektonischer Bau
3. Entwicklung der Landschaft
 3. 1. Morphogenetischer Überblick
 3. 2. Flußgeschichte
4. Hydrographische Übersicht
 4. 1. Das Gewässernetz
 4. 2. Der Niederschlag
 4. 3. Die Verdunstung
 4. 4. Der Abfluß
5. Hydrogeologie
 5. 1. Der Schwarzwaldbereich
 5. 1. 1. Das Grundgebirge
 5. 1. 2. Der Buntsandstein
 5. 2. Die Muschelkalkzone
 5. 2. 1. Grundwasserführung
 5. 2. 2. Die Karstquellen im Raum Donaueschingen
 5. 2. 3. Die Bregversickerung
 5. 2. 4. Die Markierungsversuche

- 5. 3. Das Schichtstufenland des Keupers, Lias und Doggers
 - 5. 3. 1. Der Keuper
 - 5. 3. 2. Der Untere und Mittlere Jura
- 5. 4. Die westliche Schwäbische Alb
 - 5. 4. 1. Hydrogeologische Eigenschaften der Gesteinsfolge
 - 5. 4. 2. Das Karstgebiet nördlich der Donau
 - 5. 4. 3. Das Karstgebiet südlich der Donau
 - 5. 4. 4. Das Donau-Aach-System
- 5. 5. Das Tertiär am Südrand der Alb
- 5. 6. Das Grundwasser in den quartären Ablagerungen
 - 5. 6. 1. Der Bereich des Donautales
 - 5. 6. 2. Die Hegausenke
- 6. Hydrochemie
 - 6. 1. Probenahme und chemische Untersuchungen
 - 6. 2. Chemische Beschaffenheit der Grundwässer
 - 6. 2. 1. Die Grundwässer des Grundgebirges
 - 6. 2. 2. Die Grundwässer des Buntsandsteines
 - 6. 2. 3. Die Grundwässer des Muschelkalkes
 - 6. 2. 4. Die Grundwässer des Keupers
 - 6. 2. 5. Die Grundwässer des Lias
 - 6. 2. 6. Die Grundwässer des Doggers
 - 6. 2. 7. Die Grundwässer des Malms
 - 6. 2. 8. Die Grundwässer des Tertiärs
 - 6. 2. 9. Die Grundwässer des Quartärs
 - 6. 3. Typisierung der Grundwässer
 - 6. 3. 1. Die Gliederung nach der Ionenverteilung
 - 6. 3. 2. Die Gliederung nach dem Salzgehalt
 - 6. 3. 3. Die Gliederung nach dem Reduktions-Oxydations-Zustand
 - 6. 3. 4. Die numerische Klassifikation
 - 6. 3. 5. Die Grundwassertypen
 - 6. 4. Die kartenmäßige Darstellung der hydrochemischen Daten
 - 6. 5. Faktorenanalytische Auswertung
- 7. Zusammenfassung
- 8. Literatur
 - 8. 1. Schriftenverzeichnis
 - 8. 2. Topographische und geologische Karten

Summary

1. Einleitung

Die wachsende Bevölkerungsdichte sowie die fortschreitende Technisierung und Industrialisierung haben den Schutz und die sinnvolle Nutzung des Wassers als Grundlage jeglichen Lebens zu einer der vordringlichsten Aufgaben unserer Zeit gemacht. Zur Sicherung und für den Erhalt dieser natürlichen Hilfsquelle ist auch bei uns die großräumige Bewirtschaftung einzelner Gebiete zur Notwendigkeit geworden. Rechtzeitige Vorkehrungsmaßnahmen sowie eine vorausschauende Ordnung der wasserwirtschaftlichen Entwicklung einzelner hydrologisch zusammengehörender Gebiete werden daher immer mehr zur Voraussetzung, um auch künftig die Deckung des Wasserbedarfs, die Reinhaltung der Wasserläufe, den Hochwasserschutz und andere wasserwirtschaftliche Erfordernisse zu gewährleisten.

Im Rahmen der dafür notwendigen Planungen kommt der Hydrogeologie besondere Bedeutung zu. Ihr obliegt die regionale Bearbeitung der hydrogeologischen Verhältnisse, die die Grundlage für jede weitere wasserwirtschaftliche Planung und Ausführung darstellen. Einen Beitrag zu einer solchen Erfassung und Aufnahme eines größeren, hydrologisch zusammenhängenden Gebietes soll die vorliegende Arbeit liefern.

1. 1. Aufgabenstellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine zusammenfassende Darstellung der hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der obersten Donau und des nördlichen Hegaus zu geben. Dem Aufbau des Gebietes entsprechend, war dies nur unter besonderer Berücksichtigung der karsthydrologischen Erscheinungen möglich. Durch die Anwendung statistischer und numerischer Verfahren sollten die umfangreichen hydrochemischen Daten aus dem Untersuchungsgebiet möglichst objektiv klassifiziert und dargestellt werden. Einen Versuch, die bekannte qualitative Abhängigkeit des Chemismus der Grundwässer von dem durchflossenen Gesteinskörper auch quantitativ zu erfassen, stellt die multivarianzanalytische Auswertung mittels der Faktorenanalyse dar.

Die für die Arbeit erforderlichen Untersuchungen wurden im Sommer 1966 begonnen und 1971 weitgehend abgeschlossen. Wertvolle Ergänzungen konnten durch die Möglichkeit, in Unterlagen verschiedener Ämter und Firmen Einsicht zu nehmen, gewonnen werden. Für vielfältige Unterstützung bin ich Herrn Prof. Dr. V. MAURIN von der Universität (TH) Karlsruhe, den Herren Dr. W. KÄSS und Dr. A. SCHREINER vom Geologischen Landesamt Baden-Württemberg, dem Leiter des Wasserwirtschaftsamtes Donaueschingen, Herrn Reg.-Direktor Dipl.-Ing. W. HAAS, sowie den Herren Dir. A. HAGENMEYER und W. HUBER von der Elektrizitätswerk Aach E GmbH. zu Dank verpflichtet. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützte die Untersuchungen mit einer Sachbeihilfe zur Durchführung von Markierungsversuchen.

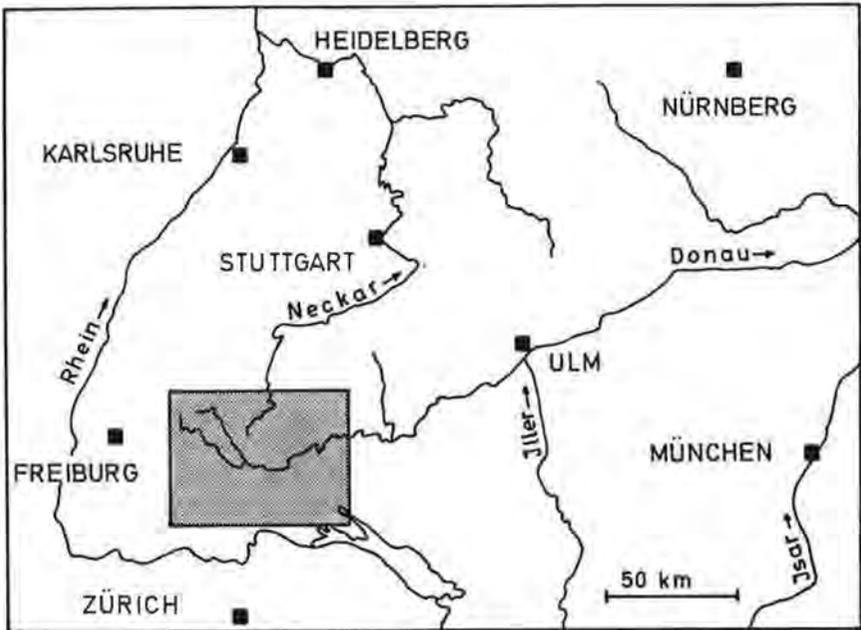


Fig. 1: Lage des Arbeitsgebietes in Südwestdeutschland.

1. 2. Geographische Lage und Abgrenzung des Arbeitsgebietes

Das Arbeitsgebiet liegt im südwestdeutschen Raum und umfaßt Teile des Schwarzwaldes, die Baar, die westliche Schwäbische Alb, den nördlichen Hegau und einen Teil der Donau-Ablach-Platte (Fig. 1, 2). Entsprechend der Zugehörigkeit zu morphologisch so unterschiedlichen Naturräumen ist die landschaftliche Gestaltung von außerordentlicher Vielfalt. Zu nennen sind die schwach geneigte Hochfläche der Schwarzwald-Ostabdachung, das breite Schichtstufenland mit dem Albtrauf und der von der Donau zerschnittenen Albhochfläche sowie das tief ausgeräumte Hegaubecken, das mit einem stärker reliefierten Hügelland zur Donau-Ablach-Platte überleitet.

Das genannte Untersuchungsgebiet, das eine Größe von rund 2000 km² hat, ist durch eine enge Verzahnung des rheinischen und danubischen Flußsystems gekennzeichnet. Am deutlichsten wird dies in der „Bifurkation“ der Donau im Bereich der verkarsteten Jura-kalke der Schwäbischen Alb, wo ein Teil des Donauwassers unterirdisch zum rheinisch entwässernden Hegau abfließt. Die Abgrenzung des Arbeitsgebietes folgt daher weitgehend der Wasserscheide zwischen dem Rhein und der Donau; nur im Süden wurde darüber hinaus-

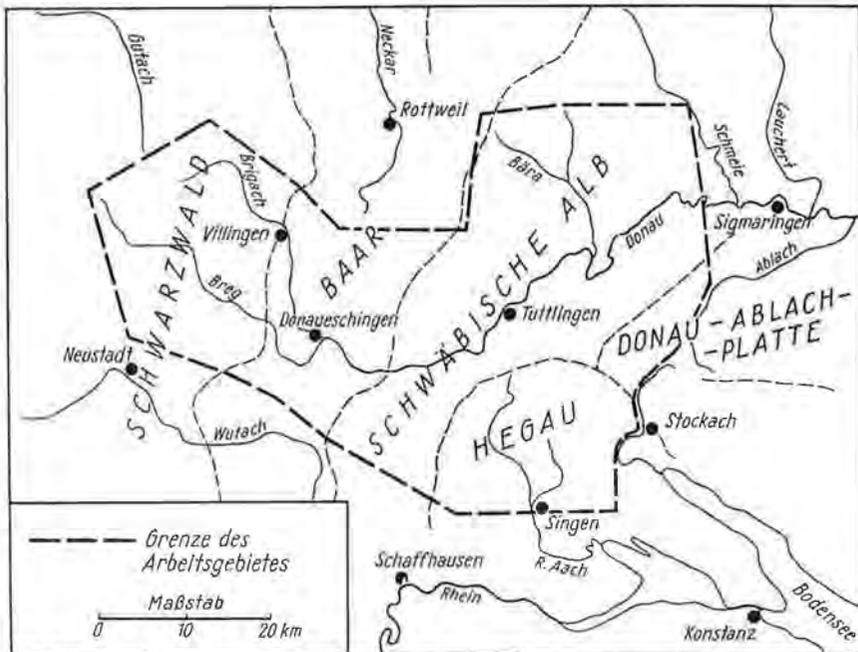


Fig. 2: Die Abgrenzung des Arbeitsgebietes und seine landschaftliche Gliederung.

gehend der hydrologisch eng mit dem Donaunraum verbundene Hegau in das Arbeitsgebiet einbezogen. Diese Zusammenfassung wurde nicht nur aus hydrogeologischen Erwägungen vorgenommen, sondern erscheint auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht sinnvoll und zweckmäßig. Im Osten folgt die Grenze des bearbeiteten Gebietes der Stockacher Aach, der Ablach sowie einer von Meßkirch über Hausen nach Norden verlaufenden Linie.

Das Untersuchungsgebiet wird von 26 Blättern der amtlichen Topographischen Karte 1:25.000 abgedeckt. Die Blattnummern sind dem Kartenverzeichnis am Ende der Arbeit zu entnehmen. Auf diese Meßtischblätter wird besonders hingewiesen, da es bei dem ca. 2000 km² großen Arbeitsgebiet nicht möglich war, eine entsprechend detaillierte Übersichtsskizze der Arbeit beizulegen.

2. Geologischer Überblick

Im Einzugsgebiet der obersten Donau treten Metamorphite und Magmatite des variszischen und prävariszischen Grundgebirges sowie Sedimente einer vom Rotliegenden bis in das Quartär reichenden

Schichtfolge auf. Auf Tafel II wurde die stratigraphische Schichtfolge nicht im einzelnen ausgewiesen, sondern zu hydrogeologischen Einheiten zusammengefaßt.

Die geologischen Verhältnisse des Bearbeitungsgebietes wurden vor allem im Zuge der geologischen Landesaufnahme erforscht. Die für die einzelnen Teilbereiche vorliegenden amtlichen geologischen Spezialkarten im Maßstab 1 : 25.000 wurden kartiert von K. C. BERZ (1932), K. C. BERZ & A. ROLL (1937), W. HAHN (1969), A. SAUER (1898), F. SCHALCH (1896, 1898, 1900, 1902, 1904, 1906 und 1907), M. SCHMIDT (1909 und 1912), A. SCHREINER (1966) sowie von W. SPITZ (1926). Neuere Spezialarbeiten über die Gesteine bzw. die stratigraphische Abfolge dieses Gebietes stammen für das Grundgebirge von S. FAISI (1951), K. R. MEHNERT (1953 und 1957), R. METZ, G. REIN & H. SCHÜRENBERG (1958), für die Trias von D. ORTLAM (1969), W. PAUL (1956) und A. VOLLRATH (1955), für den Jura von O. F. GEYER & M. P. GWINNER (1962 und 1968) und A. SCHREINER (1961 und 1966) sowie für das Tertiär und Quartär von A. SCHREINER (1965 und 1968).

2. 1. Schichtfolge und Gesteine

2. 1. 1. Das Grundgebirge

Die im wesentlichen aus den anatektischen Gneisen und Magmatiten bestehende Unterlage der permischen, mesozoischen und känozoischen Sedimentgesteine wird als das Grundgebirge bezeichnet. Es besteht aus einem älteren prävariszischen Gneisgebirge und den jüngeren variszischen Graniten.

Das Grundgebirge tritt im Westen des Untersuchungsgebietes, im Einzugsgebiet der beiden Donauquellflüsse Breg und Brigach zutage. Hierbei werden die Gneisanatexite der Zentralschwarzwälder Gneismasse und die Granite, die von einer umfangreichen Ganggefolgschaft begleitet werden, dem Tribberger- und dem Eisenbacher-Pluton zugeordnet.

2. 1. 2. Das Mesozoikum

Nach Abtragung des variszischen Gebirges bildete sich im Perm eine fast ebene Abrasionsfläche. Abgesehen von der Auffüllung einzelner Senken im Rotliegenden, deren Sedimente im Untersuchungsgebiet allerdings nur an seinem nordwestlichen Rand in kleinen Resten in Erscheinung treten, wurde der in Frage kommende Raum erst im Mittleren Buntsandstein neuerlich zum Sedimentationsgebiet. Am Rande des weite Teile Deutschlands einnehmenden Buntsandsteinbeckens gelegen, handelt es sich um eine gegenüber dem eigentlichen Beckenbereich stark reduzierte Schichtfolge. Die rötlichen bis rotbraunen Sandsteine, die vor allem im basalen Bereich durch Geröllführung von konglomeratischer Beschaffenheit sind, erreichen hier im Mittel eine Mächtigkeit von 30 m. Sie werden nach oben von den Schluff- und Tonsteinen des Röt überlagert.

Der Buntsandstein steht im Einzugsgebiet der mittleren sowie oberen Breg und Brigach in einer 10 bis 12 km breiten Nord-Süd ver-

laufenden Zone an. Die ursprünglich durchgehende Sedimentdecke ist durch die bis in das Grundgebirge eingeschnittenen Täler stark zergliedert und am Westrand in Restschollen aufgelöst.

Die teilweise lagunäre Entwicklung der Röttone leitet von der kontinentalen Fazies des Buntsandsteines zu den marinen Bildungen des *Muschelkalkes* über. Kalke, Dolomite und Mergel herrschen vor. Nur im mittleren Abschnitt sind Salinargesteine eingeschaltet. Die Gesamtmächtigkeit beträgt in Tagesaufschlüssen 140 m, davon entfallen 40 m auf den kalkig-dolomitischen unteren, 30 m auf den mergeligen mittleren und 70 m auf den kalkigen oberen Teil.

Die Mächtigkeit des Mittleren Muschelkalkes ist durch die Auflösung von Gips und Steinsalz stark reduziert. Dort, wo unter dem abdichtenden Deckgebirge noch die vollständige Sedimentfolge vorliegt, beträgt seine Mächtigkeit 115 m und besteht im wesentlichen aus Gips, Anhydrit und Steinsalz. Das bis zu 30 m mächtige Steinsalzlager wird im Raum Bad Dürkheim durch Solung ausgebeutet.

Das Verbreitungsgebiet des Muschelkalkes schließt sich an die Buntsandsteinzone im Osten an und umfaßt das Einzugsgebiet der unteren Breg und Brigach. Durch eine gut ausgebildete Schichtstufe tritt die 5 bis 6 km breite Muschelkalkzone deutlich im Landschaftsbild hervor.

Das von einzelnen Vorstößen unterbrochene Zurückweichen des Meeres verursachte im *Keuper* eine faziell sehr uneinheitliche und häufig wechselnde Sedimentation. Während im Unteren Keuper brakische Bildungen (Schiefertone und Sandsteine) mit einzelnen marinen Einschaltungen (Dolomite) überwiegen, dominiert im Mittleren Keuper der festländische Charakter eines mehr oder weniger abflußlosen Beckens mit terrestrischen, limnischen und salinaren Ablagerungen (Mergel mit Gipseinschaltungen sowie Sandsteine). Der durch eine beginnende neuerliche Transgression sowie eine sehr lückenhafte Schichtfolge gekennzeichnete Obere Keuper fehlt im Untersuchungsgebiet.

Trotz dieses Fehlens der obersten Schichten erreicht der Keuper im Bereich der oberen Donau eine Gesamtmächtigkeit von 90 bis 110 m. Seine Nord-Süd verlaufende, etwa 5 km breite Ausstrichzone deckt sich nördlich der Donau weitgehend mit dem Einzugsgebiet der Stillen Musel. Im Raum von Donaueschingen werden die Keuperablagerungen von den quartären Aufschüttungen des Donaueschinger Riedes weitgehend überdeckt, so daß sich erst wieder südlich von Hüfingen eine durchgehende Zone einstellt, die sich verschmälernd nach Südwesten fortsetzt.

Die neuerliche Transgression des Meeres an der Wende vom Rät zum *Lias* führte zu einer Überflutung Südwestdeutschlands, wo sich ein während der ganzen Jurazeit wirksam bleibender marin-epikontinentaler Ablagerungsraum ausbildete. Dieser war dem im Süden an-

schließenden alpinen Geosynklinebereich vorgelagert.

Die epikontinentale Sedimentfolge des Unteren Jura besteht aus einer ca. 40 m mächtigen, vorwiegend tonig-mergeligen Schichtfolge mit kalkigen und sandigen Einschaltungen. Diese Gesteine stehen im Bereich des Albvorlandes an. Die Ausstrichbreite beträgt an der Südwestgrenze des Einzugsgebietes, südlich von Hüfingen, nur 400 m, verbreitert sich aber im Zuge einer morphologischen Verflachung nach Nordosten auf 4 km.

Im Dogger bedingte der unstete Ablauf der epirogenen Bewegungen häufig wechselnde Sedimentationsbedingungen. Aufarbeitungshorizonte und wiederholte Faziesveränderungen kennzeichnen daher die Schichtfolge des Mittleren Jura. Sie besteht in den unteren Partien überwiegend aus Tonen, im mittleren und oberen Teil aus eisenoolithischen, kalkigen, sandigen und tonigen Sedimenten. Die Mächtigkeit dieser Serie beträgt im Bereich der obersten Donau etwa 220 m. Ihre Ausstrichfläche ist noch Teil des Albvorlandes bzw. bildet die Basis der tief eingeschnittenen Täler des nordwestlichen Albrandes.

Im Zuge einer großräumigen Umstrukturierung im Ma l m wurde das epikontinentale süddeutsche Becken zu einem Randmeer der Tethys. In diesem sich immer mehr verflachenden Schelfbereich kamen helle karbonatische Sedimente zur Ablagerung.

Die Gesteine des Oberen Jura haben im untersuchten Gebiet einen wesentlichen Anteil am Aufbau des östlichen Abschnittes. Ihre Grenze nach dem Westen bildet die Schichtstufe des Albraufes, dessen Verlauf etwa mit der Linie Blumberg—Spaichingen angegeben werden kann. Im einzelnen nehmen die oberjurassischen Schichten die felsigen Steilhänge im Donautal sowie die nördlich bzw. südlich anschließende Albhochfläche ein.

Die Schichtfolge des Weißen Jura erreicht im Bereich der westlichen Alb eine Mächtigkeit von rund 400 m. Sie besteht aus einer Abfolge von Kalk- und Mergelkomplexen, die zur weiteren Untergliederung Anlaß gegeben haben. Im allgemeinen überwiegt in den tieferen Lagen die gebankte Ausbildung, während im höheren Teil, besonders im Abschnitt östlich von Fridingen, die massige Schwammfazies vorherrscht.

2. 1. 3. Das Tertiär

Nach der Verlandung des Jurameeres setzte eine langdauernde Periode der festländischen Verwitterung und Abtragung ein. Umgelagerte bohnerzföhrnde Rückstandstone sind in einzelnen Senken und Mulden der Albhochfläche, aber auch in Karstspalten angereichert worden, wo sie zum Teil bis heute erhalten blieben.

Im Alttertiär einsetzende tektonische Bewegungen verursachten im süddeutschen Raum eine erneute Umstrukturierung und leiteten damit eine Entwicklung ein, die schließlich zur heutigen Oberflächen-

gestaltung führte. Im Süden entstand als Vortiefe des alpinen Orogens der Molassetrog, in den bei zunehmender Absenkung auch der südöstliche Teil des Untersuchungsgebietes einbezogen wurde. Das Verbreitungsgebiet sowie die Mächtigkeiten der Molasse sind heute durch junge Abtragung stark reduziert. Im Einzugsgebiet der Donau sind die tertiären Schichten fast nur noch auf der Albhochfläche südlich der Aitrach und der Donau anzutreffen. Größere Bedeutung kommt ihnen noch in dem südlich anschließenden Bereich des Hegaubeckens und seiner Umrahmung zu.

Als Randfazies der Molasse weichen diese Ablagerungen stärker von der Normalausbildung ab. Sie sind durch Schuttlieferungen aus dem im Nordwesten anschließenden Abtragungsgebiet gekennzeichnet. Für den Untersuchungsraum von Bedeutung ist die als Juranagelfluh bezeichnete Folge von gelbbraunen Mergeln, Kalksandsteinen, Konglomeraten und nicht verfestigten Geröllagen. Die ältere Juranagelfluh, die vielfach nur als fluviatile Rinnenfüllung vorliegt, entspricht der Unteren Süßwassermolasse (Chatt — Aquitan), die jüngere der Oberen Süßwassermolasse (Helvet — Unterer Pliozän).

Im oberen Miozän setzte ein basischer Vulkanismus ein, der in einer Nord-Süd streichenden Zone im westlichen Hegau aus mehreren Schloten zunächst Tuffe und dann Basalt förderte. Die vulkanische Tätigkeit endete im Pliozän mit dem Aufdringen von Phonolithen. Der nordwestliche Ausläufer dieses Vulkanismus ist der Wartenberg westlich von Geisingen im Donautal.

2. 1. 4. Das Quartär

Im Bereich der obersten Donau kommen pleistozäne Ablagerungen in größerer räumlicher Ausdehnung nur im Einzugsgebiet der Ablach vor. Eine weite Verbreitung haben sie hingegen im Hegaubecken und seiner unmittelbaren Umrahmung. Es sind ausschließlich jungpleistozäne, glaziale bis fluvioglaziale Sedimente, die auf den aus den Alpen über den Bodensee nach Norden vorgestoßenen Rheingletscher zurückgehen.

Dieser erreichte während der Rißeiszeit seine größte Ausdehnung. Seine Endmoränen, die man als Altmoränen den würmeiszeitlichen Jungmoränen gegenüberstellt, liegen teilweise direkt auf den Malmkalken. Die Würmvereisung blieb im Bereich Engen — Eigeltingen — Stockach etwa 4 bis 8 km hinter der Maximalausdehnung in der Rißeiszeit zurück.

Südlich von Engen, Aach und Eigeltingen erreichen die jungpleistozänen Talfüllungen Mächtigkeiten von über 50 m. Diese sind fast ausschließlich würmeiszeitlich, da durch die vorausgehende interglaziale Eintiefung die älteren Talfüllungen weitgehend ausgeräumt wurden.

In das Holozän zu stellen sind die zahlreichen Torfmoore besonders im Bereich der Ausstrichzone von Keuper, Lias und Dogger, ferner die Talalluvionen, Hangschuttbildungen sowie meist kleinere Vorkommen von Sinterkalken.

2. 2. Schichtlagerung und tektonischer Bau

Das Einzugsgebiet der obersten Donau gehört zwei unterschiedlich strukturierten tektonischen Einheiten an — dem Schwarzwald-Schild und der Schwäbischen Alb. Beide gehören zur „Südwestdeutschen Großscholle“, die durch eine nachvariszische germanotype Tektonik ihre charakteristische Formung erhielt (W. CARLÉ, 1955).

Der Schwarzwald stellt eine 140 km lange Aufwölbungszone des Grundgebirges in rheinischer Richtung dar. Seine Heraushebung erfolgte im Tertiär und Quartär und ist im Zusammenhang mit dem Einbruch des Oberrheingrabens zu sehen (H. ILLIES, 1965, 1972). Die nach Osten anschließende Einheit der Schwäbischen Alb ist dagegen eine Nordnordwest aufgekippte Platte. Der eigentlichen Kippung im Tertiär durch die Ausbildung der alpinen Vortiefe im Südosten ging eine Heraushebung am Ende des Jura voraus. Der Westteil der Albplatte wurde noch in die Hochwölbung des Schwarzwald-Schildes einbezogen, so daß sich ein allmählicher Übergang dieser beiden Einheiten ergibt.

Naturgemäß sind die heutigen Lagerungsverhältnisse im mesozoischen Deckgebirge (Fig. 3) weitgehendst eine Folge dieser jungen tektonischen Vorgänge. Auf der Ostabdachung des Schwarzwaldes streichen die Schichten parallel der rheinisch ausgerichteten Aufwölbungsachse und fallen flach (2 bis 7°) gegen Osten bzw. Ostsüdost ein. Im Osten des Untersuchungsgebietes beobachtet man dagegen Nordost- bis Ostnordost-Streichen entsprechend dem der aufgekippten Albplatte. Das Einfallen erfolgt flach (2 bis 4°) nach Südosten, wobei die mesozoischen Schichten am Albsüdrand zunehmend steiler abtauchen.

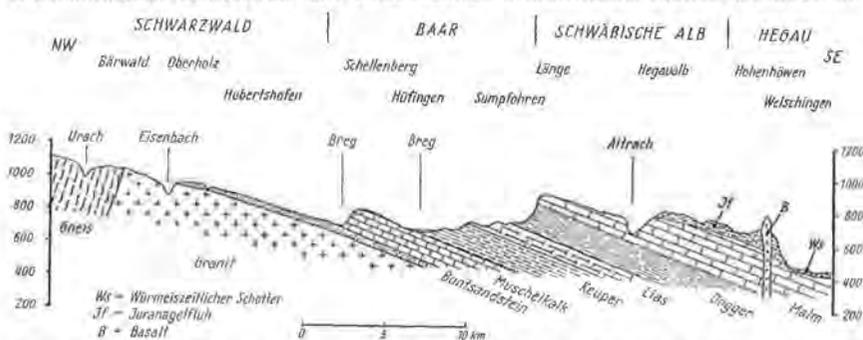


Fig. 3: Geologisches Profil durch das Arbeitsgebiet vom Schwarzwald bis in den Hegau.

Im variszisch geprägten Grundgebirge sind die Lagerungsverhältnisse komplizierter. Bei steilem bis mittelsteilem Einfallen wechselt das Streichen der Gneiskörper relativ häufig. Die zahlreichen granitischen Gänge verlaufen vielfach parallel zum Streichen der Gneise, durchsetzen diese aber meist wesentlich steiler.

Zwei bedeutende Störungssysteme durchziehen das Untersuchungsgebiet. Am Südrand verläuft die herzynisch streichende Lenzkirch-Bonndorfer-Bruchzone, die über den Hegau bis in den Bodenseeraum zu verfolgen ist. Nach Westen setzt sie sich bis in den Oberrheingraben bei Freiburg fort. Ihre tiefreichende Anlage wird durch die auf ihr liegenden tertiären Vulkangebiete des Hegaus und des Kaiserstuhls besonders hervorgehoben.

Im östlichen Teil quert das rheinische Hegau-Heldburg-Lineament (W. CARLÉ, 1952) das Untersuchungsgebiet. Es ist im Hegau mehr im Sinne einer vulkanotektonischen Linie zu verstehen, da nach A. SCHREINER (1970) die ihm ursprünglich zugezählte Hegau-Hauptverwerfung nicht existent ist. Weitere, von den genannten beiden Systemen unabhängige Störungen in Nordwest-, Nordnordwest-, Nordnordost- und Nordost-Richtung sind sowohl im Bereich des Schwarzwaldes als auch der Schwäbischen Alb und ihrem Vorland zu beobachten. Sie sind meist nur über relativ kurze Strecken zu verfolgen, können aber zum Teil beträchtliche Sprunghöhen erreichen.

Die Hauptkluftrichtungen des Untersuchungsgebietes folgen dem bereits in den verschiedenen Brüchen und Störungssystemen zum Ausdruck kommenden tektonischen Beanspruchungsplan des südwestdeutschen Raumes. Während jedoch bei den Störungen zahlenmäßig das herzynische Element überwiegt, dominiert bei der Klüftung die rheinische Richtung.

3. Entwicklung der Landschaft

3. 1. Morphogenetischer Überblick

Der morphologische Formenreichtum des Untersuchungsgebietes ergibt sich aus der Zugehörigkeit so gegensätzlicher Landschaften wie des Schwarzwaldes und des zur Molassezone gehörenden Hegaubeckens. Seine bestimmende Kennzeichnung erhält jedoch dieser Raum durch die breite, zum klassischen Südwestdeutschen Schichtstufenland gehörende Übergangszone. Die Ausbildung der Oberflächenformen entstand in direkter Abhängigkeit von dem durch Krustenverbiegungen gekennzeichneten großtektonischen Geschehen im Laufe eines seit der Kreide andauernden Abtragungsprozesses (G. WAGNER, 1929).

Mit der Regression des Jurameeres wurde der gesamte Bereich der obersten Donau landfest und ist es mit geringen Ausnahmen am südöstlichen Rand bis heute geblieben. Über das Geschehen nach der

Landwerdung und über die Ausgestaltung der Oberfläche in der Kreide und im Alttertiär liegen uns nur wenige Anhaltspunkte vor. Im Südosten wurde ein Teil der alten Landoberfläche durch Ablagerungen des Molassemeeres zunächst konserviert und im Zuge der jungen, fortschreitenden Abtragung wieder freigelegt. Sie zeigt uns, daß damals ein nur wenig gegliedertes Flachrelief vorgeherrscht hat.

Die Entwicklung des heutigen Formenschatzes setzte im späten Alttertiär mit gegenläufigen vertikalen Krustenbewegungen im Westen und Südosten ein. Die Heraushebung im Westen löste eine nach Osten fortschreitende Abtragung des Deckgebirges aus, in deren Folge eine erste, zunächst ausschließlich erosive Schichtstufenlandschaft entstand. Mit dem Nachlassen der Vertikalbewegungen am Ende des Miozäns bildete sich im Pliozän ein schwach skulptierter, mehr durch Denudation als durch Erosion gekennzeichnet, ausgereifter Landschaftstyp. Die vermutlich im Mittelpliozän einsetzende jüngste und in einzelnen Etappen bis in die Gegenwart anhaltende Bewegungsphase löste eine neuerliche umfangreiche Abtragung aus, in der die Erosion erneut vorherrschte. Durch die besonders kräftige Heraushebung des Schwarzwaldes trat eine Versteilung der Schicht- und Landschaftsneigung ein.

Während heute die danubische Entwässerung sich wieder ausgeglichenen Gefällsverhältnissen nähert, schreitet im rheinischen Flußsystem in Folge der Tieferlegung der Erosionsbasis am Oberrhein die Eintiefung weiter fort. Die dadurch begünstigte rückschreitende Erosion, die sich besonders an subsequenten Tiefenrinnen sowohl vom Hochrhein im Süden als auch vom Norden über den Neckar und seine Zuflüsse auswirkt, führt zu einer laufenden Einengung des danubischen Gewässernetzes.

Neben dem großtektonischen Geschehen waren an der Ausgestaltung des heutigen Landschaftsbildes, insbesondere der Kleinformen, zahlreiche weitere Faktoren wie Salzauslaugung und Verkarstung von Bedeutung. Besonders sei auf den Einfluß des Klimas im Pleistozän mit dem wiederholten Wechsel von Warm- und Kaltzeiten hingewiesen. Direkte glaziale bzw. fluvioglaziale Einwirkungen sind im Bereich des Hegaus durch den bis an den Südostrand der Schwäbischen Alb vorgestoßenen Rheingletscher zu beobachten. Das Schichtstufenland ist dagegen durch periglaziale und der Schwarzwald durch nivale und periglaziale Bildungen dieser Zeit gekennzeichnet.

Zu den beherrschenden morphologischen Großformen gehören heute die flach geneigte Denudationsfläche der Schwarzwald-Ostabdachung, die Schichtstufen des Muschelkalkes, Keupers und Jura (Fig. 4), die Albhochfläche, die teilweise als Auflagerungsfläche der Molasse herauspräpariert wurde und zum Teil noch alttertiäre Elemente enthält, sowie das glazial geformte Hegaubecken mit den nach Norden zurückgreifenden, tief eingeschnittenen Kerbtälern und den als Kegelberge herausmodellierten vulkanischen Härtlingen.



Fig. 4: Das Donautal bei Neudingen (links) mit der Stufenlehne des Lias (bewaldet) und der Schichtstufe des Mittleren Doggers (Wiesengelände) sowie dem Albtrauf (bewaldet) im Hintergrund; rechts der Wartenberg. Aufnahme vom Fürstenberg nach Nordosten.

3. 2. Flußgeschichte

Im Tertiär bildete sich auf der leicht nach Südosten geneigten und damals noch weit nach Norden reichenden Juratafel ein System von Folgeflüssen, die zum Molassebecken hin entwässerten. Diese praedanubischen Folgeflüsse luden das mitgeführte Material in gewaltigen Schuttfächern (Juranagelfluh) am Beckenrand ab.

Nach der Verfüllung des Molassebeckens entwickelte sich im Unteren Pliozän die Urdonau als Sammelrinne für die aus dem ehemaligen Einzugsbereich des Molassebeckens kommenden Gerinne. Alte Schotter, die man auf der Albhochfläche noch an verschiedenen Orten findet (O. MANZ, 1934), enthalten alpine Materialkomponenten. Sie beweisen, daß die Entwässerung aus den Alpen einschließlich der Aare über die Sammelrinne der Urdonau am Nordrand der Molasse erfolgte. Die Aare, der damals noch ein aus den südlichen Vogesen und dem südlichen Oberrheingraben kommendes Gewässernetz tributär war, floß über den Klettgau nach Norden und vereinigte sich bei Blumberg mit der Feldberg-Donau (H. LININGER, 1964 und 1966, H. ILLIES, 1965, W. FINK, 1966). Das Einzugsgebiet dieser frühmittelpliozänen Urdonau

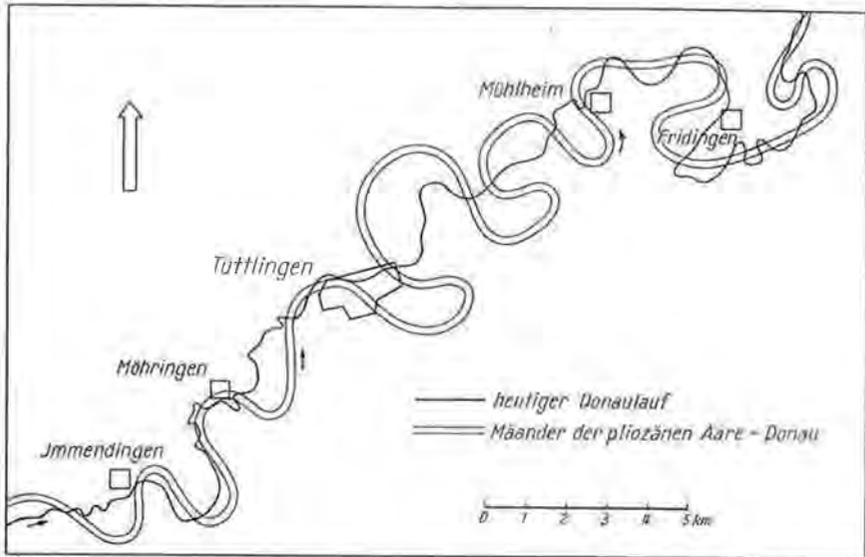


Fig. 6: Der Verlauf der pliozänen Donau im Abschnitt zwischen Immen-
dingen und Fridingen (nach G. WAGNER, 1929, O. MANZ, 1934, und
G. HAHN, 1969).

Die im Oberen Pliozän und im Pleistozän intensivierte Absenkung des Oberrheingrabens leitete infolge der damit verbundenen Tieferlegung der rheinischen Erosionsbasis eine weitere, heute noch nicht abgeschlossene Veränderung in der Verteilung der Einzugsgebiete zugunsten des Rheins ein. Von Norden her vergrößerte der in den Rhein mündende Neckar sein Einzugsgebiet. Durch intensive rückschreitende Erosion eroberte er an der Wende Pliozän—Pleistozän das ca. 1500 km² große Einzugsgebiet der Ureschach, die bis dahin über die Spaichinger Pforte bei Tuttlingen in die Donau geflossen war (G. WAGNER, 1963, und J. STEMMER, 1963).

Zur selben Zeit wurde im Süden die Aare dem Rhein tributär. Im Abschnitt des heutigen Hochrheins paßte sie sich der tieferen Erosionsbasis des Oberrheingrabens an, wodurch die rückschreitende Erosion im südlichen Schwarzwald, im Klettgau sowie in Richtung Bodensee intensiviert wurde. Die Folge war in Zusammenhang mit den ersten Vorstößen des Rheingletschers ins Vorland die Anzapfung des bis dahin zur Donau fließenden Alpenrheins (A. SCHREINER, 1970), ferner die Ausräumung des Hegaubeckens sowie in der Würmeiszeit die Ablenkung der Feldbergdonau durch die Wutach (Fig. 7).

Durch den weitgehenden Verlust ihres Einzugsgebietes ist die oberste Donau heute ein morphologisch inaktiver Fluß, dem kaum

noch Erosionskraft zukommt. Ihr Tal hat sich seit Beginn des Quartärs nur mehr wenig verändert. Es ist ein Relikt der pliozänen Landschaft, die beherrscht wurde von dem gewaltigen Stromsystem der Urdonau, dessen Aufgabe es war, die früher aus allen Richtungen dem westlichen Molassetrog zufließenden Gewässer zu sammeln und dem sich nach Osten zurückziehenden Meer zuzuführen.

Ausgehend von der tiefen Erosionsbasis am Oberrhein konnte der Rhein immer mehr an Bedeutung gewinnen und die Donau nach Osten zurückdrängen. Nur ein kleiner Rest, das hier zu besprechende Gebiet der obersten Donau, verblieb ihr im südwestdeutschen Raum, aber auch dessen Zerfall ist nur noch eine Frage der Zeit. Bereits heute versickert die Donau oberhalb von Tuttlingen zeitweise vollständig, um über die verkarsteten Jurakalke unterirdisch dem rheinischen Gewässernetz zuzufießen.



Fig. 7: Die Blumberger Pforte von Westen mit dem Eichberg links, dem Taltorso des Aitrachtales und der Stadt Blumberg in der Mitte und dem Buchberg rechts. Im Vordergrund Reste der Talverebnung der Feldberg-Donau, deren direkte Fortsetzung in das Aitrachtal durch den tiefen, nach Süden abbiegenden Einschnitt der Wutach unterbrochen ist.

4. Hydrographische Übersicht

4. 1. Das Gewässernetz

Die Dichte des Gewässernetzes im Einzugsgebiet der obersten Donau variiert in großem Maße entsprechend der lithologischen Vielfalt seines Untergrundes und dessen hydrogeologischen Eigenschaften. Im Bereich des Schwarzwaldes finden wir im Grundgebirge ein dichtes, fein verästelt System von Rinnen und Bächen, die in recht gleichmäßigem Abstand das Gebiet überziehen. Wesentlich weitmaschiger und weniger verzweigt ist das Netz im Bereich der Buntsandsteinzone, doch immer noch dicht im Verhältnis zu der nur von wenigen Wasserläufen durchflossenen Landschaft des Muschelkalkes.

Auf den weitgehend undurchlässigen Schichten des Albvorlandes zeichnet sich wieder ein dichteres Gewässernetz ab, das besonders im Bereich der Doggertone reich verästelt ist. Daran schließt sich die infolge ihrer geringen Flußdichte auf allen Gewässerkarten leicht zu erkennende Schwäbische Alb an. Aus der weithin verkarsteten Landschaft fließen der Donau nur wenige oberirdische Flüsse zu. Deutlich hebt sich von ihr das im Süden anschließende Tertiär- und Quartärgebiet mit einer intensiveren hydrographischen Gliederung ab.

Die beiden Donauquellflüsse Breg und Brigach entspringen nur unweit voneinander im Mittleren Schwarzwald. Sie fließen in südöstlicher Richtung und vereinigen sich kurz unterhalb von Donaueschingen zur eigentlichen Donau. Die Breg besitzt bei einer Flußlänge von 48,5 km ein Einzugsgebiet von 291 km². Die 42 km lange Brigach entwässert 191 km².

Der Donau fließen aus dem Albvorland von Norden die Stille Musel, der Weihergraben und die Köthach zu. Vom Süden mündet ein der Marbengraben, dessen Wasser im wesentlichen aus dem Donaueschinger Ried kommt, sowie die bereits auch den südwestlichen Teil der Albhochfläche entwässernde Aitrach. Das Einzugsgebiet der Donau vergrößert sich dadurch bis Kirchen-Hausen — nur 30 km nach der Vereinigung der beiden Quellflüsse — auf 764 km².

Infolge der Verkarstung und der unterirdischen Anzapfung des danubischen Systems durch die rheinische Entwässerung hat die Donau in dem fast genau 100 km langen Abschnitt der Schwäbischen Alb zwischen der bei Kirchen-Hausen einmündenden Aitrach und der Ablach keinen nennenswerten Zufluß aus dem Süden. Von Norden laufen der Donau im Albbereich mehrere Bäche zu. Ihr oberirdisches Entwässerungsnetz weist aber nur wenige Verzweigungen auf. Die linksseitigen Zubringer sind der Amtenhauserbach bei Zimmern, der Weißenbach bei Immendingen, der Krähenbach bei Möhringen, die Elta bei Tuttlingen, der Kesselbach bei Stetten, der Lipbach und der Wulfbach bei Mühlheim sowie die Bära bei Frindingen und die Schmeie kurz

oberhalb von Sigmaringen. Das von der Donau bis Sigmaringen entwässerte Niederschlagsgebiet umfaßt 1688 km².

Der südliche Teil des Arbeitsgebietes von rund 400 km², die Hegaualb und der Hegau werden durch die Stockacher Aach mit dem Krebsbach, durch die Radolfzeller Aach mit dem Saubach und durch die Biber im Westen entwässert.

4. 2. Der Niederschlag

Im Gebiet der obersten Donau ist generell eine Abnahme der Niederschlagsmenge von Westen nach Osten festzustellen. Im einzelnen wird dies durch das differenzierte Relief mit den an Luv- und Leelagen bedingten Unterschieden modifiziert.

Die höchsten Niederschlagswerte (Fig. 8) treten im Quellgebiet von Breg und Brigach im Scheitelpunkt des Schwarzwaldes in Höhen von über 1000 m auf. Die mittleren Jahresniederschlagssummen betragen dort bis zu 1800 mm. In der unmittelbar anschließenden extremen Leelage gehen sie jedoch rasch zurück. Nur 20 km weiter im Osten im Raum von Villingen—Donauessingen, in einer Höhe von

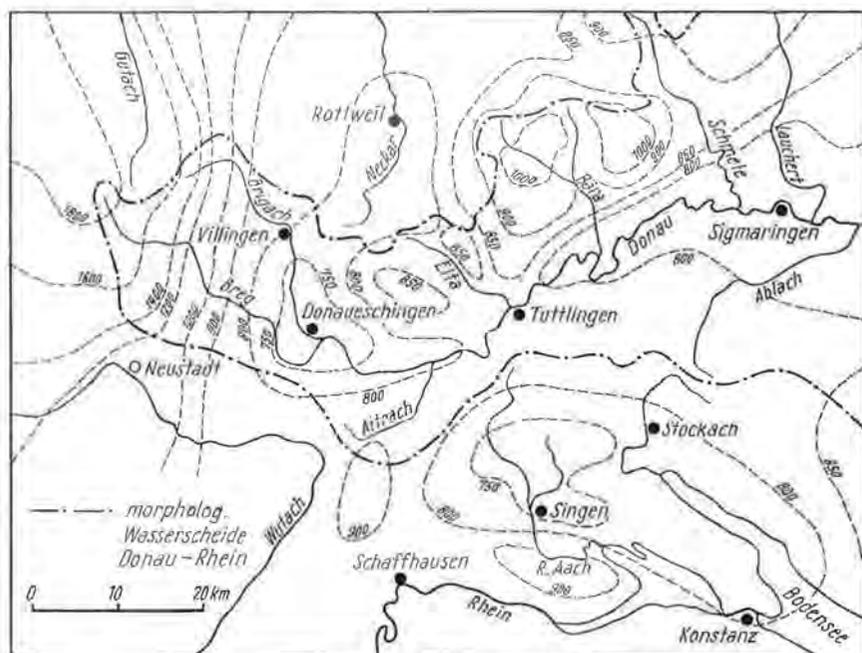


Fig. 8: Die mittleren jährlichen Niederschlagssummen im Einzugsgebiet der obersten Donau in mm. (Die Angaben sind dem Klimaatlas von Baden-Württemberg 1953 entnommen.)

700 bis 800 m, betragen sie nur noch 750 bis 800 mm. Im Luvbereich der Schwäbischen Alb klettern die Werte wieder hoch, und zwar in steigendem Maße, je weiter der Albrauf vom Schwarzwald entfernt ist. Während der mittlere Jahresniederschlag im Bereich der Länge bei 850 mm liegt, erhöht sich dieser Wert im Bereich nordöstlich von Spaichingen auf 1000 mm. Bis zum Albrand im Süden gehen die Werte wieder auf 800 mm zurück. In der besonders geschützten Lage des Hegaus sinken sie bis unter 750 mm ab.

Auch die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge ist sehr unterschiedlich. Im Kammbereich des Schwarzwaldes einschließlich seiner Leelage überwiegt der Winterniederschlag. Aber bereits nach einer schmalen Übergangszone in der Baar, in der die Mittel des Sommer- und Winterhalbjahres sehr ausgeglichen sind, nimmt nach Osten der Sommerniederschlag relativ zu. Aus einer Darstellung von R. KELLER (1958) ist zu entnehmen, daß im Albbereich nördlich der Donau der Sommerniederschlag 150 Prozent, südlich der Donau 170 Prozent und im Hegau bereits 200 Prozent des Winterniederschlages umfaßt.

4. 3. Die Verdunstung

Nach den Übersichtskarten von W. WUNDT (1958) und A. WECHMANN (1964) ist für das Einzugsgebiet der obersten Donau eine mittlere jährliche Verdunstung von 400 bis 550 mm anzunehmen. Analog zu den Niederschlagsverhältnissen finden sich die hohen Werte zwischen 450 und 550 mm im Kammbereich des Schwarzwaldes und seiner Ostabdachung. Im Albvorland und in der Schwäbischen Alb betragen die Werte im allgemeinen zwischen 400 und 450 mm. Im Gegensatz zum Niederschlag nimmt die mittlere jährliche Verdunstung im Hegau wieder zu, was im wesentlichen auf das Überwiegen der Sommer-niederschläge zurückzuführen ist.

In jüngster Zeit durchgeführte Detailuntersuchungen im nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes (G. STRAYLE, 1970) lassen erkennen, daß die angeführten Werte für die verkarstete Albhochfläche, wo der Niederschlag rasch in größere Tiefen einzudringen vermag, etwa um 10 Prozent zu hoch angesetzt sind. Eine genaue Verteilung kann jedoch in Ermangelung ausgedehnter Untersuchungen nicht angegeben werden.

4. 4. Der Abfluß

Der Jahreslauf der verschiedenen Flüsse und Bäche im Untersuchungsgebiet zerfällt, wie auch im gesamten übrigen südwestdeutschen Raum, in ein abflußreiches Winterhalbjahr (November bis April) und ein abflußarmes Sommerhalbjahr. Besonders ausgeprägt sind diese Verhältnisse durch das Vorherrschen der Winterniederschläge im Einzugsgebiet von Breg und Brigach im Schwarzwald. Der Abfluß aus

Tabelle 1: Die mittleren Abflußpenden verschiedener Einzugsgebiete im Bereich der obersten Donau (nach dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, Sonderheft Land Baden-Württemberg, Abflußjahr 1966).

Fluß	Einzugsbereich	Höhenlage in m über NN	Beobachtungs- zeitraum	Abflußpenden in l/s · km ²		
				Winter- halbjahr	Sommer- halbjahr	Jahr
Urach	Schwarzwald	800—1100	1958/66	37,2	19,7	28,4
Breg bis Hammer- eisenbach	Schwarzwald	760—1100	1927/65	35,7	19,8	27,7
Kirnach	Schwarzwald	740—1000	1958/66	33,6	13,1	23,2
Brigach bei Villingen	Schwarzwald	750—1000	1959/66	25,6	10,7	18,1
Brigach bei Donaeschingen	Schwarzwald	680—1000	1934/65	20,6	10,4	15,6
Donau bei Kirchen- Hausen	Schwarzwald, Baar und Schwäb. Alb	660—1100	1950/65	20,7	10,6	15,6
Krähenbach	Alb und Alb- vorland	650— 850	1960/66	10,9	6,9	8,9
Ablach	Ablach-Donau- Platte	550— 750	1960/66	8,1	6,2	7,1
Stockacher Aach	Hegau	430— 750	1939/65	9,2	7,4	8,3

diesem Gebiet beeinflusst den gesamten Donaulauf im Untersuchungsbereich. Im Zusammenhang mit der Schneeschmelze kommt es im April zum Abflußmaximum. Sehr rasch fällt die Wasserführung danach mit dem Einsetzen der Vegetationsperiode ab und erreicht bereits im August einen Tiefstand, wobei die geringe Wasserführung vielfach bis in den Winter anhält.

In der Schwäbischen Alb und im Hegau wird der höhere Anteil der Sommerniederschläge durch die verstärkte Verdunstung wieder aufgehoben, so daß er im Regime der Flüsse kaum zum Ausdruck kommt. Auch hier ist daher der Abfluß des Winterhalbjahres höher, die jahreszeitlichen Unterschiede sind aber, wie auch aus der Tabelle 1 deutlich hervorgeht, nicht mehr so stark ausgeprägt wie bei den Schwarzwaldflüssen. Das Abflußmaximum fällt, je nach Schneeschmelze, in die Zeit zwischen Februar und April, die starke Wasserführung hält dann meist bis in den Juni an. Von Juli bis September geht die Wasserführung laufend zurück und erreicht im Oktober die niedersten Werte.

Nach der Karte der mittleren Abflußpenden in der Bundesrepublik Deutschland von W. WUNDT (1958) variieren die Abflußpenden im Untersuchungsgebiet zwischen 10 und 35 l/s · km². Die hohen Werte mit 35 l/s · km² entfallen, den Niederschlagsmengen entsprechend, auf die Kammlagen des Schwarzwaldes. Sie sinken bis in den Raum von Donaueschingen auf 10 l/s · km² ab. In der Schwäbischen Alb nehmen die Werte infolge der erhöhten Niederschläge und der durch die Verkarstung bedingten verringerten Verdunstung wieder zu. Nach W. WUNDT sind für dieses Gebiet Abflußpenden von 10 bis 14 l/s · km² anzunehmen. Auf Grund der Untersuchungen von E. VILLINGER (1969) und G. STRAYLE (1970) wird man aber im Bereich der verkarsteten Hochfläche mit 12 bis 17 l/s · km² rechnen können. Zum Teil unter 10 l/s mal km² liegen die Werte im Hegau.

5. Hydrogeologie

5.1. Der Schwarzwaldbereich

5.1.1. Das Grundgebirge

Die verschiedenen Gesteine des Grundgebirges — Gneise, Granite und Granitporphyre — gleichen sich in ihrem hydrogeologischen Verhalten weitgehend. Sie sind im frischen, nicht zerklüfteten Zustand wasserundurchlässig. Erst Verwitterung und Zerklüftung schaffen die für die Wasserführung notwendigen Hohlräume. Das Lockermaterial der an Ort und Stelle entstandenen Verwitterungsprodukte sowie die häufig nur wenig hangabwärts gewanderten Schuttmassen bilden den

im allgemeinen geringmächtigen Grundwasserträger, dessen Sohl-schicht der unverwitterte Fels darstellt.

Art und Mächtigkeit der durch Verwitterung bedingten Gesteins-auflockerung ist im Gneis und Granit verschieden. Der Gneis ver-wittert an der Oberfläche zu einem lehmigen Grus, der nach unten in scherbig zerfallendes, aufgelockertes Gestein übergeht. Auch der blockige bis kleinstückige Gneisschutt im Bereich der Hänge und Runsen führt reichlich grusig-lehmige Bestandteile. Die Mächtigkeit der Verwitterungsschwarte beträgt im allgemeinen 1 bis 4 m.

Für die Wasserführung wesentlich günstiger ist die sandig-grusige Verwitterung der Granite. Der lockere Granitgrus, dem einzelne feste Blöcke (Wollsäcke) eingelagert sind, reicht vielfach bis zu einer Tiefe von 10, zum Teil auch bis zu 20 und mehr Metern. Im Unter-suchungsgebiet neigt besonders der mittel- bis grobkörnige Eisen-bacher Granit zu einer tiefgründigen Verwitterung.

Durch die starke Zertalung mit den zahlreichen Runsen und Ge-ländeeinschnitten sowie durch das Relief der immer wieder bis zur Oberfläche durchdringenden unverwitterten Gesteine ist die Aus-dehnung der einzelnen geschlossenen Grundwasserkörper innerhalb der Auflockerungszone eng begrenzt. Die zugehörigen Wasseraustritte sind nur von geringer Ergiebigkeit und weisen starke Schüttungs-schwankungen auf.

Für die Wasserführung im Grundgebirgsbereich (Tafel II) sind neben der Verwitterungs- und Schuttdecke die Klüfte und Spalten von Bedeutung. Sowohl Gneise als auch Granite sind in der oberflächen-nahen Zone gut geklüftet. Da sich die Spalten aber rasch nach der Tiefe schließen, ist die tiefgreifende Wasserzirkulation nur von unter-geordneter Bedeutung. Der Übergangsbereich vom Verwitterungs-schutt zum festen Fels ist durch Klüfte und Spalten besonders aufge-lockert. Dort wirkt das Kluftnetz zum Teil als Basisdränage für das Wasser der darüberliegenden Verwitterungsdecke. Am Ausstrich dieser Klüfte können deutlich ausgebildete Quellnischen auftreten.

Die beschränkte Wasseraufnahmefähigkeit, besonders im Gneis-bereich, und ein damit verbundener verstärkter oberirdischer Abfluß bestimmen die Hydrographie im Grundgebirge. Das feinverästelte Gewässernetz besteht aus einem engmaschigen System meist kleiner Gerinne, die das Wasser der zahlreichen, an die einzelnen flachen Grundwasserkörper gebundenen Quellen ableiten. Die mittlere Schüt-tung der meisten Quellen beträgt im Gneisgebirge 0,1 bis 0,5 l/s, im Granitbereich zwischen 0,7 und 1 l/s. Die einzelnen Quellen sind durch große Schwankungen ihrer Schüttung gekennzeichnet. Auf Nieder-schläge sprechen sie meist innerhalb kurzer Zeit an und können bei länger anhaltenden Trockenwetterperioden teilweise vollkommen ver-siegen. In der Tabelle 2 sind die monatlichen Schüttungswerte für die Zeit vom März 1959 bis Mai 1960 der für die Wasserversorgung von

Tabelle 2: Schüttung (in l/s) der Quellen für die Wasserversorgung Furtwangen in der Zeit von März 1959 bis Mai 1960 nach Unterlagen des Wasserwirtschaftsamtes Donaueschingen.

Quellgruppe	Quell-Nr.	1959										1960				
		2. 3.	6. 4.	5. 5.	1. 6.	6. 7.	18. 8.	1. 9.	1. 10.	11. 11.	3. 12.	26. 1.	12. 2.	7. 3.	9. 4.	11. 5.
Bühlhofen	1	0,77	1,02	1,16	0,07	2,50	0,55	0,45	0,25	0,18	0,19	0,66	0,31	0,50	0,29	0,45
	2	0,50	0,89	1,25	0,62	1,66	0,41	0,26	0,13	0,08	0,14	0,50	0,50	0,38	0,20	0,27
	3	1,00	1,53	2,12	1,11	2,50	0,71	0,55	0,31	0,22	0,25	0,83	0,83	1,05	0,38	0,55
	4	0,33	0,77	3,23	0,27	1,00	0,20	0,16	tr.	tr.	0,06	0,47	0,29	0,55	0,55	0,07
Ganterdobel	5	2,50	3,22	2,85	2,00	3,33	1,42	0,76	0,35	0,40	0,71	2,18	1,42	1,72	0,66	0,90
	1	0,42	0,70	1,16	0,50	1,27	0,36	0,25	0,12	0,07	0,12	0,61	0,45	0,34	0,20	0,30
	2	0,55	0,66	0,71	0,50	1,00	0,37	0,15	0,18	0,13	0,12	0,45	0,45	0,33	0,22	0,33
	3	0,22	0,26	0,37	0,83	0,43	0,13	0,16	0,06	0,03	0,06	0,20	0,20	0,13	0,10	0,13
Leingraben	4	0,54	1,53	1,00	0,63	1,03	0,34	0,21	0,10	0,09	0,20	0,60	0,52	0,54	0,19	0,30
	li	0,77	0,43	1,42	0,23	1,11	0,45	0,31	0,21	0,27	0,45	1,25	0,62	0,66	0,45	0,58
Kohlhütte	re	0,14	0,25	0,32	0,08	0,31	0,10	0,05	0,03	tr.	0,02	0,12	0,33	0,04	0,03	0,05
	li	0,71	1,66	2,00	0,43	2,00	0,45	0,29	0,18	0,15	0,22	0,90	0,71	0,55	0,28	0,37
Werherdobel	re	0,12	0,14	0,15	0,06	0,30	0,07	0,03	0,02	0,03	0,03	0,13	0,07	0,07	0,03	0,07
	li	0,50	0,83	0,83	0,37	1,00	0,33	0,23	0,15	0,11	0,14	0,41	0,37	0,40	0,18	0,26
Dilgerhof	re	0,66	1,52	0,66	0,47	0,50	0,38	0,27	0,15	0,08	0,06	0,52	0,35	0,40	0,23	0,45
	1 (re+li)	1,43	1,17	1,45	1,02	0,92	0,95	0,70	0,60	0,50	0,48	1,22	0,56	0,90	0,70	0,99
	2 (re+li)	0,50	1,33	0,52	0,38	0,97	0,29	0,28	0,21	0,16	0,18	0,44	0,77	0,35	0,24	0,33
	3 (re+li)	0,77	0,92	0,92	0,36	0,81	0,33	0,19	0,13	0,10	0,13	0,62	0,46	0,30	0,17	0,27
Rothausen	4 re	1,42	0,85	2,00	1,41	2,50	1,11	0,90	0,76	0,66	0,85	1,81	1,42	1,42	0,91	1,16
	4 li	—	0,21	0,01	tr.	0,13	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.
	2	1,66	3,33	2,22	1,41	2,50	1,09	0,83	0,66	0,66	0,73	2,38	1,66	1,53	0,93	1,22
	3	1,42	3,33	1,95	1,24	2,00	1,07	0,90	0,71	0,72	0,74	3,22	1,25	1,53	1,11	1,25
Bernhardenhof	1 re	0,50	0,62	0,71	0,45	0,66	0,43	0,36	0,33	0,34	0,37	0,52	0,38	0,62	0,38	0,37
	1 li	0,45	1,11	0,58	0,43	0,83	0,32	0,24	0,21	0,26	0,30	0,66	0,45	1,53	0,31	0,34
	17	1,66	1,66	2,00	1,24	2,50	0,66	0,43	0,28	0,31	0,71	2,85	1,00	1,33	0,83	0,58
	18	0,34	0,08	0,20	0,06	0,08	0,06	0,03	0,05	0,05	0,07	0,16	0,06	—	0,06	—
	19 li	0,10	0,20	0,13	0,10	0,22	0,06	0,07	0,04	0,03	0,01	0,07	0,09	0,06	0,07	0,15
	19 re	0,25	0,83	0,33	0,23	0,71	0,17	0,14	0,11	0,11	0,13	0,20	0,20	0,14	0,12	0,07
Schattendobel	20 li	0,12	0,32	0,15	0,08	0,90	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,20	0,12	0,25	0,09	0,16
	20 re	0,52	1,00	1,00	0,66	2,50	0,47	0,14	0,13	0,08	0,14	0,43	0,45	0,27	0,18	0,09
	Summe	0,06	0,19	0,17	0,11	0,31	0,08	0,05	0,02	tr.	0,15	0,10	0,08	0,40	0,03	0,27
	Summe	20,93	32,56	33,57	17,35	38,48	13,50	9,51	6,58	5,91	7,84	24,71	16,37	18,29	10,12	12,33

Furtwangen genutzten Quellen eingetragen. Ihr Einzugsgebiet liegt ausschließlich im Gneisbereich.

Die Erneuerung des Grundwassers erfolgt ganzjährig, eine langfristige Speicherung ist bei dem geringen Rückhaltevermögen nicht möglich. Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen sind in Anbetracht des flachen und oberflächennahen Grundwasserleiters beträchtlich und umfassen den Bereich von 2 bis 10° C. Eine relative Temperaturkonstanz weist auf Kluftwässer hin bzw. läßt bei Schuttquellen auf deren Beteiligung schließen. Das Auftreten der Quellen ist entsprechend der Art des Aquifers an keine bestimmte Höhenlage gebunden. So entspringen die „Gipfelquellen“ nur wenige Meter unter der Kammlinie der breiten Bergrücken, da dort die Verwitterungsschwarte vielfach durch den begrenzenden Steilhang angeschnitten ist.

Die zahlreichen Quellen, deren weiches Wasser trotz des oberflächennahen Grundwasserleiters wegen des ausgedehnten Waldbestandes hygienisch meist einwandfrei ist, werden vor allem für die Wasserversorgung der vielen verstreuten Einzelgehöfte genutzt. Auf Schwierigkeiten stößt die Versorgung größerer Ortschaften. Bei der geringen Ergiebigkeit der Quellen muß meist eine sehr große Zahl von Wasseraustritten gefaßt werden. Die Stadt Furtwangen nutzt zum Beispiel 40 im weiteren Umkreis gelegene Quellen, die in Trockenzeiten zusammen nur wenig mehr als 5 l/s schütten (Tabelle 2). In Anbetracht der vielen Brunnenstuben und des weitgespannten Leitungsnetzes sowie deren Betreuung stellt dies wirtschaftlich keine optimale Lösung dar. So ist es nicht verwunderlich, daß trotz des reichlichen Quellenangebotes größere Gemeinden zur Errichtung einzelner Brunnen im Bregtal (zum Beispiel Furtwangen und Vöhrenbach) bzw. überhaupt zur Fremdwasserversorgung (zum Beispiel Bodenseewasser für Sankt Georgen) übergehen, um ihren erhöhten Wasserbedarf abzudecken.

5. 1. 2. Der Buntsandstein

Im Verbreitungsgebiet des Buntsandsteins (Tafel II) bestehen, bedingt durch die unterschiedliche lithologische Ausbildung dieser Sedimentfolge, verschiedene Grundwasser- und Quellhorizonte. Das Grundwasser zirkuliert sowohl im klüftigen als auch porösem Medium, wobei in der vertikalen Schichtfolge die Bedeutung des Kluft- und Porenraumes wechselt.

Der wichtigste Grundwasserleiter des Buntsandsteins ist im Untersuchungsgebiet der geröllführende Basiskomplex, bestehend aus dem mürben und porösen Eck'schen Konglomerat (su früher sm_{c1}) und dem unmittelbar darüberfolgenden stärker zerklüfteten, festeren Hauptkonglomerat (sm_{c2}). Der im Nordschwarzwald zwischengeschaltete, geröllfreie Hauptbuntsandstein (sm), der dort einen mächtigen und ergiebigen Aquifer abgibt, fehlt im Einzugsgebiet der oberen Donau.

In dem einheitlichen Grundwasserkörper kommt den mürben Sandsteinen an der Basis die Rolle einer flächigen Drainage der darüberliegenden, klüftigeren Bänke zu. Die zugehörige Sohlschicht bildet die permische Abrasionsfläche. Die Verwitterungsprozesse vor Ablagerung des Buntsandsteins haben eine recht wasserundurchlässige Schicht entstehen lassen, die heute im gesamten Schwarzwald als ausgeprägter Quellhorizont in Erscheinung tritt. Alle größeren Buntsandsteinquellen im Bereich von Breg und Brigach sind an diesen Horizont gebunden.

Einen weiteren Grundwasserträger bilden die hellen, kieseligen Sandsteine (sm_k). Das Wasser, das vor allem in den Klüften zirkuliert, tritt teilweise über dem schluffigen Violetten Horizont 1, einer fossilen Bodenbildung, zutage. Seine Stauwirkung dürfte jedoch nur sehr gering sein, so daß zwischen dem kieseligen Sandstein und dem darunterliegenden Hauptgrundwasserstockwerk noch eine enge hydrologische Beziehung besteht. Ähnliches gilt auch für den Plattensandstein (so_{1,3}) und den ihn nach unten abschließenden Karneolhorizont (VH 2). Auch er dürfte kaum so dicht sein, um das Durchsickern des Wassers nach der Tiefe zu unterbinden. Allerdings tritt er gegenüber dem VH 1 etwas deutlicher als Quellstufe hervor, doch haben die einzelnen Quellen nur geringe Schüttung. Einen wichtigen Wasserstauer stellen schließlich die den Buntsandstein nach oben abschließenden Röttone (so₄) dar.

Die Einsickerungsmöglichkeiten für das Niederschlagswasser sind im Mittleren Buntsandstein sehr gut. Doch streichen diese Schichten meist nur in einem schmalen Streifen am Rande der so-Tafel aus. Auf den Hochflächen bilden die lehmigen Sandböden des Oberen Buntsandsteins dichtere, weniger durchlässige Bereiche. Verstärkter oberirdischer Abfluß sowie sumpfige Nässungsstellen sind die Folge. Am Übergangsbereich von der so-Fläche zum Mittleren Buntsandstein kann es zur Versickerung einzelner Gerinne kommen. Keine oder nur geringe Einsickerungsmöglichkeiten bieten die feinsandigen Tone des Röts, deren Ausstrichflächen durch weite Sumpfwiesen gekennzeichnet sind.

Die Quelldichte ist im Buntsandsteingebiet (Tafel II) sehr verschieden. Auf der nach Osten geneigten, waldbestandenen Hochfläche einschließlich der nur wenig in die Sandsteinstufe eingetieften, flachen Talmulden ist die Zahl der Wasseraustritte relativ klein. Zudem beträgt ihre Schüttung meist nur wenige Zehntelliter pro Sekunde. Die Quellen werden zum Teil für die auf der Buntsandsteinfläche liegenden Ortschaften, wie Herzogenweiler, Tannheim (Quellgruppe im Gewinn Wolfsjagen), Mistelbrunn und Hubertshofen genutzt, decken aber heute kaum noch den erhöhten Wasserbedarf.

Im Gegensatz zur Hochfläche treten in den bis in das Grundgebirge eingeschnittenen Tälern zahlreiche Quellen auf. Neben Breg und Brigach durchschneiden auch Kirnach, Wieselbach, Bruderbach und

Tabelle 3: Schüttungen (in l/s) der für die Wasserversorgung Villingen im Wieselsbachtal gefaßten Quellen in der Zeit von Jänner 1968 bis Juli 1969 nach Unterlagen des Wasserwirtschaftsamtes Donaueschingen.

Quell-Nr.	1968											1969						
	5. 1.	6. 2.	4. 3.	5. 4.	3. 5.	4. 6.	5. 7.	5. 8.	6. 9.	4. 10.	4. 11.	3. 1.	3. 2.	4. 3.	4. 4.	2. 5.	6. 6.	4. 7.
1—4	4,84	7,85	13,50	11,71	9,25	5,95	4,74	13,92	5,07	10,42	7,03	—	—	14,21	15,47	9,06	10,13	7,57
5	—	—	2,66	5,20	2,67	1,22	1,43	1,54	4,00	2,92	2,18	—	3,75	3,90	4,00	2,66	3,15	1,93
6	1,33	1,12	2,60	2,67	1,54	0,72	0,52	0,63	2,72	1,30	0,91	—	—	2,35	2,45	1,04	1,38	0,78
7	—	—	4,00	4,14	1,07	0,42	0,23	0,36	3,10	1,32	0,69	—	—	4,00	3,25	0,80	1,39	0,53
8	—	0,51	0,70	0,67	0,49	0,31	0,22	0,20	0,74	0,52	0,44	0,38	—	0,75	0,77	0,51	0,53	0,37
9	0,61	—	1,11	0,91	0,59	0,47	0,49	0,48	1,14	0,66	0,59	0,54	2,03	1,14	0,98	0,61	0,66	0,52
10	2,42	2,69	2,90	3,16	3,70	2,54	2,75	2,58	2,80	3,19	3,04	2,98	3,18	3,29	4,05	3,52	3,39	2,89
11—12	2,14	2,14	2,30	2,92	1,82	1,78	1,76	2,00	2,85	2,06	1,85	2,06	4,28	2,56	2,40	2,06	2,06	1,82
13	1,13	—	3,53	3,00	1,08	0,56	0,28	1,50	2,35	2,30	0,86	—	—	2,92	2,90	0,88	1,21	0,82
14	1,58	1,26	3,00	3,15	1,41	0,71	0,60	1,14	2,40	1,82	1,04	1,06	3,53	3,35	2,80	1,08	1,72	1,00
15	0,62	0,46	1,45	1,08	0,51	0,33	0,25	0,39	0,90	0,51	0,33	0,33	—	1,05	0,93	0,40	0,50	0,33
16	—	—	1,43	1,40	1,26	0,94	0,96	0,96	1,33	1,16	0,96	1,06	1,32	1,30	1,48	1,20	1,33	1,04
17	—	—	3,01	2,40	0,82	0,62	0,49	0,53	2,07	0,96	0,72	—	—	1,84	1,54	0,81	0,88	0,82
18	0,64	0,61	1,22	1,10	0,61	0,31	0,20	0,19	0,98	0,60	0,40	0,40	—	1,05	1,03	0,52	0,71	0,38
19	1,22	1,17	1,64	1,46	1,23	1,10	1,14	1,09	1,80	1,67	1,52	1,52	—	1,72	2,19	1,51	1,41	1,35
20	3,45	3,40	3,83	8,98	4,75	3,33	1,77	2,46	8,07	4,20	3,64	3,74	—	8,08	9,00	4,34	5,11	3,78
21	—	—	0,12	0,11	0,18	0,17	0,15	0,18	0,18	0,24	0,18	—	—	0,24	0,21	0,17	0,18	0,16
22	—	—	2,60	1,93	1,04	0,33	0,26	0,36	1,47	1,09	0,67	0,70	4,00	2,18	2,07	0,71	1,27	0,48
23	0,42	0,42	0,54	0,48	0,43	0,20	0,14	0,18	0,43	0,43	0,27	0,36	0,60	0,58	0,56	0,43	0,45	0,30
24	—	—	1,25	0,98	0,57	0,37	0,38	0,35	0,75	0,67	0,47	—	—	0,97	1,02	0,49	0,64	0,44
25	—	—	0,17	0,17	0,13	0,12	0,11	0,11	0,13	0,13	0,12	—	—	0,16	0,19	0,13	0,13	0,12
26	—	—	1,54	1,40	0,61	0,32	0,28	0,43	1,43	1,26	0,57	0,70	—	1,60	1,75	0,53	0,69	0,37
27	—	—	3,75	3,33	1,56	0,43	0,47	0,69	2,85	1,76	1,20	1,26	—	2,85	4,00	1,05	1,66	0,74
28	—	—	4,80	3,75	0,92	0,64	0,61	0,64	2,50	1,18	0,71	0,73	—	2,40	3,34	0,80	1,23	0,59
29	—	—	1,50	1,40	0,62	0,29	0,29	0,30	0,33	0,65	0,55	—	—	1,14	1,24	0,47	0,66	0,31
30	—	—	0,14	0,15	0,13	0,11	0,11	0,14	0,12	0,13	0,09	—	—	0,13	0,13	1,22	0,16	0,10
31	0,26	0,26	0,31	0,29	0,24	0,17	0,17	0,17	0,28	0,31	0,26	0,25	0,67	0,32	0,27	0,20	0,21	0,22
32	—	0,55	1,00	0,92	0,46	0,30	0,29	0,28	0,86	0,56	0,39	0,42	0,96	1,04	0,92	0,41	0,64	0,34
33	—	—	0,38	0,31	0,29	0,20	0,17	0,18	0,36	0,32	0,31	0,31	—	0,36	0,30	0,28	0,24	0,25
34	—	—	0,12	0,12	0,11	0,09	0,09	0,08	0,12	0,30	0,10	—	—	0,12	0,11	0,11	0,11	0,09
35—38	0,98	0,71	6,45	6,32	3,34	2,04	1,76	2,32	8,39	5,47	3,74	3,17	13,25	9,62	8,50	3,67	3,83	2,32
39	—	—	0,57	0,33	1,58	0,15	0,16	0,17	0,43	0,17	0,21	—	—	0,27	0,26	0,21	0,16	0,15
40—43	2,50	1,67	3,64	2,86	1,86	1,41	1,12	1,22	3,78	2,35	1,71	2,78	5,00	4,66	4,14	2,12	2,44	1,54
Summe	24,14	24,82	77,76	78,80	46,87	28,65	24,39	37,77	66,73	52,63	37,75	24,75	42,57	82,15	84,25	44,00	50,26	34,45

Brändbach die gesamte Buntsandsteinplatte, und zwar durchwegs im konsequenten Lauf von Westen nach Osten. Die Wasseraustritte liegen, soweit es sich nicht um Schuttfolgequellen handelt, im Niveau der permischen Auflagerungsflächen, dem schon erwähnten Hauptquellhorizont, der parallel zur Schichtneigung flach gegen Osten einfällt.

Die Quellen werden teilweise sowohl von Einzelgehöften als auch von kommunalen Wasserwerken genutzt. Im Bereich der Nebengräben des Brigachtales liegen Quellfassungen für St. Georgen (6 Quellen mit zusammen ca. 10 l/s bei herbstlichem Niedrigwasser), für Peterzell und für Mönchweiler. An den Hängen des Bregtales befinden sich Fassungen für Wolterdingen und für Vöhrenbach. Ein schönes Beispiel bietet das schmale Wieselbachtal, in dem das Grundgebirge auf eine Länge von 4 km gerade noch angeschnitten wird. Hier hat die Stadt Villingen in dem ca. 5,5 km langen oberen Talabschnitt 43 Quellen gefaßt, deren Gesamtschüttung ebenfalls bei herbstlichem Niedrigwasser ungefähr 35 l/s beträgt (Tabelle 3).

Für die Versorgung von größeren Gemeinden stellt die Fassung dieser relativ schüttungsschwachen Quellen, auch wenn sie in großer Zahl auftreten, keine wirtschaftlich optimale Lösung dar. Beraten vom Geologischen Landesamt von Baden-Württemberg in Freiburg im Breisgau gingen daher einzelne Gemeinden, wie Bräunlingen, Tannheim, Pfaffenweiler und Villingen, zum Bau von Tiefbrunnen über. Zur Erschließung bietet sich vor allem der nach Osten abtauchende, zunächst nur vom Oberen Buntsandstein, dann auch vom Muschelkalk überlagerte, konglomeratische Basiskomplex des Buntsandsteins an.

Die bisher abgeteuften Bohrungen, die je nach Lage zwischen 20 und 100 m tief sind, haben eine sehr unterschiedliche Förderleistung. Die gewinnbaren Wassermengen variieren zwischen 2 und 15 l/s. Im allgemeinen zeigt sich eine Abnahme der möglichen Fördermenge bei zunehmender Überdeckung. Über Art und Herkunft dieser Tiefenwässer haben W. KÄSS (1967) und K. EISSELE (1967) berichtet.

5. 2. Die Muschelkalkzone

5. 2. 1. Grundwasserführung

Die hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich des Muschelkalkes (Tafel II) werden bestimmt durch die vielfältigen Lösungsvorgänge in der aus karbonatischen und salinaren Gesteinen aufgebauten Schichtfolge. Die Wasserbewegung erfolgt primär in den Klüften und Schichtfugen. Heute kommt der Verkarstung, besonders im oberen Teil dieser Schichtfolge, große Bedeutung für die Wasseraufnahmefähigkeit und Wasserwegsamkeit zu. Den Grundwasserleiter bilden im allgemeinen die Schichten des Unteren und Oberen Muschelkalkes. Der Mittlere Muschelkalk stellt in seinem über Tage ausstreichenden,

ausgelaugten Zustand einen mehr oder weniger ausgeprägten Stauhori-
zont dar.

Der Untere Muschelkalk bildet auf Grund seiner differenzierten lithologischen Ausbildung keinen einheitlichen Grundwasserkörper. Mergelige Zwischenlagen rufen immer wieder einzelne Stauhori-
zonte von lokaler Bedeutung hervor. Ein zusammenhängendes Grundwasser-
stockwerk findet sich örtlich in den dolomitischen und kalkigen Schichten. Die darauf beruhenden Quellhorizonte treten im Unter-
suchungsgebiet infolge ihres schmalen Ausstriches meist nur mit einzel-
nen Überlaufquellen (Schüttung: 1 bis 2 l/s) in Erscheinung.

Die mächtige Anhydrit- und Salzfolge des Mittleren Muschelkalkes ist im Bereich der zirkulierenden Wässer weitgehend ausgelaugt und der ursprünglich über 100 m mächtige Komplex in den über Tage aus-
streichenden Partien auf 20 bis 30 m reduziert (Fig. 9). Durch die Auslaugung kommt es zu einer relativen Anreicherung der unlöslichen, vorwiegend mergeligen und tonigen Lagen bzw. zu einer Verdichtung der bindigen Restkomponenten, so daß die reduzierte Gesteinsfolge weitgehend wasserundurchlässig ist. Einzelne, an geringmächtige Zwischenlagen von dolomitischen Mergeln, feinkörnigen Dolomiten

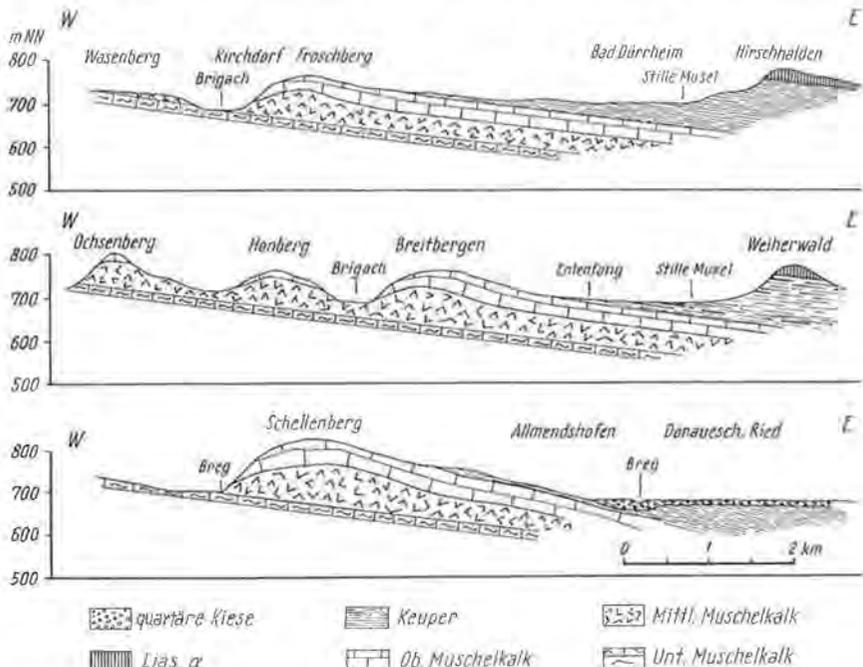


Fig. 9: Geologische Profile durch die Muschelkalkzone zwischen Bad Dürrenheim und Hüfingen (nach W. PAUL 1958).



Fig. 10: Der Obere Muschelkalk im Steinbruch an der Bundesstraße 1 km östlich von Marbach bei Villingen. Im Liegenden der Trochitenkalk, darüber der grobbankige Marbacher Oolith.

und Zellenkalke gebundene Wasseraustritte haben nur eine unbedeutende Schüttung, wobei sie vielfach gerade im Ausstrichbereich am Schichtstufenhang nur als Nässungsstellen ausgebildet sind. Treten größere Quellen auf, so hängen sie durchwegs mit dem Karstwasser des darüberliegenden Hauptmuschelkalkes zusammen.

Die stark zerklüfteten und verkarsteten Kalke des Oberen Muschelkalkes (Fig. 10) stellen einen idealen Grundwasserleiter dar, der nach unten von den tonigen und mergeligen Auslaugungsresten des Mittleren Muschelkalkes abgeschlossen wird. Auf der vom Oberen Muschelkalk eingenommenen Landoberfläche erfolgt der Abfluß der Niederschlagswässer fast ausschließlich unterirdisch. Das Wasser, das im allgemeinen dem Schichtfallen folgend nach Osten abfließt, tritt am Rande der Keuperüberdeckung in großen Karstquellen wieder zutage. Wasseraustritte sind auch dort zu beobachten, wo in Tälern, zum Beispiel im Marbachtal oder Brigachtal bei Aufen, die wasserundurchlässige Sohlenschicht des Karstkörpers angeschnitten wird.

Die Ergiebigkeit dieser Quellen ist zum Teil sehr beträchtlich, doch treten erhebliche Schüttungsschwankungen in Abhängigkeit von den jeweiligen Witterungsverhältnissen auf. Dagegen bleibt die Tem-

peratur der Quellwässer sehr konstant und entspricht mit 8 bis 9° C annähernd dem jahreszeitlichen Mittel der Lufttemperatur. Die Queldichte ist, wie auch in anderen Karstgebieten, relativ gering. Daher verwundert es nicht, daß die wenigen Wasseraustritte trotz gewisser, durch das verkarstete Einzugsgebiet bedingter hygienischer Mängel zur Wasserversorgung der nahen Dörfer und Städte verwendet werden.

5. 2. 2. Die Karstquellen im Raum Donaueschingen

Die bedeutendsten Quellen des Muschelkalkes treten, wie schon angedeutet, im Osten an der Grenze zu den überlagernden Keuperschichten auf. In dieser Position befindet sich auch die Quellgruppe südlich der Brigach, zwischen Donaueschingen und Allmendshofen (Fig. 11). Es handelt sich hierbei fast durchwegs um Waller, wobei das Karstwasser durch eine bis zu 14 m mächtige Überdeckung von Lettenkeuper und quartären Kiesen artesisch nach oben dringt. Genaue Beobachtungen des Grundwasserstandes (Reichsamt für Bodenforschung — Zweigstelle Freiburg, unveröffentlichter Bericht vom 12. Jänner 1942) haben ergeben, daß die Quellaustritte auf lokal sehr begrenzte Grundwasseraufdomungen im Kieskörper der jungen Auffüllung zurückgehen. Diese können nur so erklärt werden, daß die unterlagernde, den Karstkörper abdichtende Keuperdecke (Fig. 9, Profil 3) im Bereich von heute durch Schotter überdeckter und eingebneter Dolinen unterbrochen ist, wodurch das Karstwasser die Möglichkeit hat, nach oben aufzudringen.

Die größeren dieser Karstwasseraufbrüche sind die Gutterquelle (Fig. 11, Quelle Nr. 8) mit einer maximalen Schüttung bis zu 250 l/s und die Buriquelle (Nr. 10 und 11) mit 10 bis 40 l/s, die Brauereiquelle (Nr. 6) mit 25 bis 50 l/s, die Schwanenteichquelle (Nr. 4) mit 20 bis 100 l/s, die Parkquelle (Nr. 3) mit einer maximalen Schüttung von etwa 150 l/s und die Juniperusquelle (Nr. 15) bei Allmendshofen mit einer maximalen Schüttung von etwa 150 l/s.

Die Stadt Donaueschingen wurde bisher im wesentlichen durch eine Oberflächenfassung an der Gutterquelle mit laufenden Entnahmen von 40 bis 90 l/s versorgt. Bei der Errichtung dieser Fassung 1936 sollen im Rahmen eines Pumpversuches bis zu 650 l/s gefördert worden sein. Für die geplante Entnahme von 150 l/s wurde 1969 unmittelbar neben der Gutterquelle ein Brunnen mit einer Tiefe von 12 m und einem Durchmesser von 180 cm abgeteuft, der nunmehr die alte Oberflächenfassung ersetzt. Bei dem Probepumpversuch im Oktober 1969 mußte bei 255 l/s und einer gleichzeitigen Entnahme von 44 l/s in der 5 m entfernten Gutterquelle die Förderleistung gedrosselt werden, da in der 200 m entfernten Fassung der Brauereiquelle der Wasserspiegel um 50 cm, damit unter die Kiesaufschüttung, abgesunken war. Ebenfalls trocken fiel die Juniperusquelle bei Allmendshofen. In der Gutter-

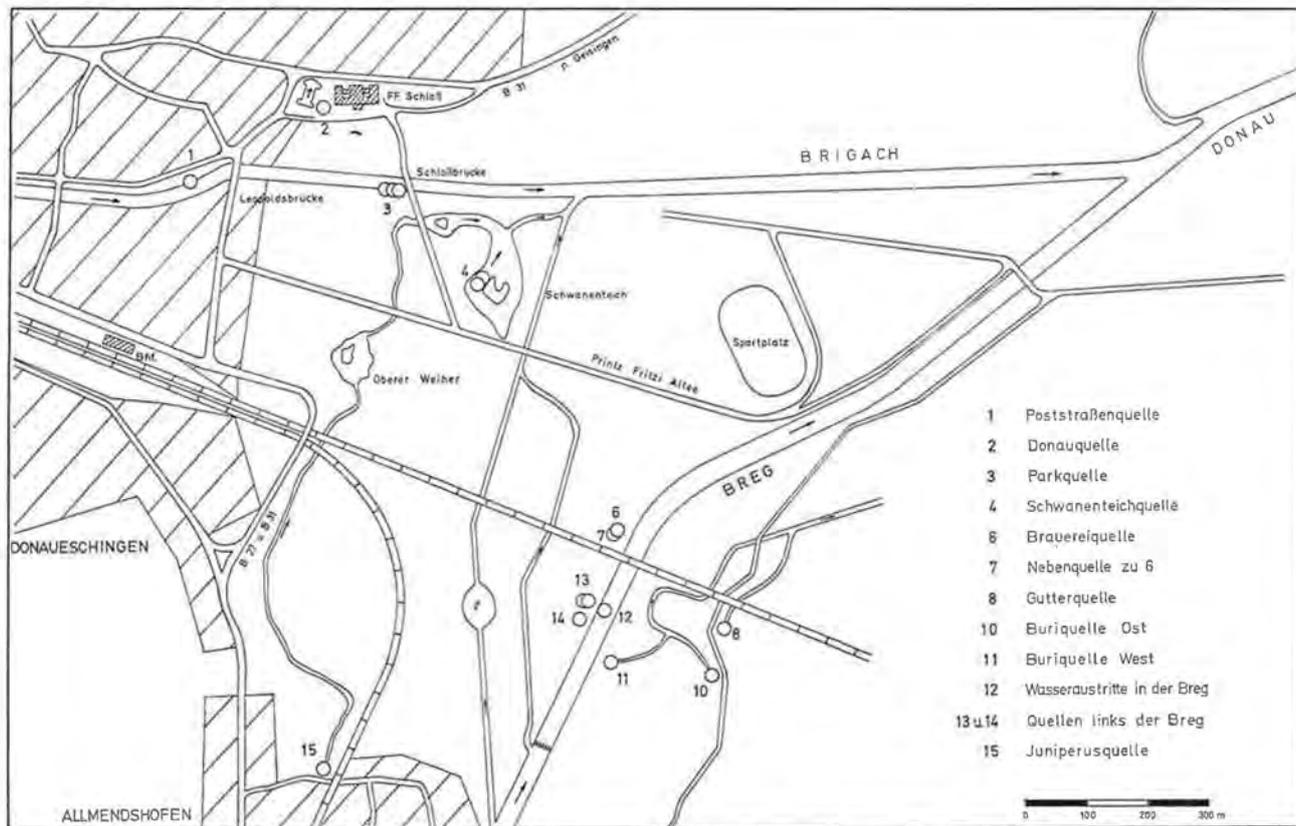


Fig. 11: Die Lage der Karstquellen im Raum Donaueschingen—Allmendshofen.

quelle betrug die Absenkung 70 cm, im Brunnen selbst 380 cm. Auch in einzelnen Tiefbrunnen bei Hüfingen machte sich der Pumpversuch bemerkbar.

Unmittelbar nördlich der Brigach liegt im Schloßpark von Donaueschingen die „Donauquelle“ (Nr. 2). Sie hat eine Schüttung von 15 bis 70 l/s. Ihr in Kiesen nahe einer 8 m hohen Muschelkalkwand aufstoßendes Wasser weist auf einen ursprünglich tieferen Wasseraustritt hin. Sie steht in einer engen hydraulischen Beziehung zu der nur 70 m entfernten Poststraßenquelle (Nr. 1), aus der 20 l/s zu Kühlwasserzwecken für die Fürstlich Fürstenbergische Brauerei entnommen werden. Während eines dort mit über 100 l/s gefahrenen Pumpversuches versiegte die nahe Donauquelle vollständig. Das Karstwasser des Oberen Muschelkalkes wird neben den bestehenden Quelfassungen in mehreren Bohrungen für die Wasserversorgung gewonnen. Solche Tiefbrunnen bestehen für die Wasserversorgung von Hüfingen, für einzelne Industriebetriebe zwischen Hüfingen und Donaueschingen und für landwirtschaftliche Betriebe nördlich von Donaueschingen. Die Förderleistung der genannten Brunnen liegt zwischen 5 bis 30 l/s.

Für den Raum Donaueschingen ergibt sich ein sichtbarer Karstwasserabfluß von zusammen 400 l/s in Mangelzeiten und rund 1000 l/s in Zeiten stärkerer Wasserführung. Für das in Frage kommende Einzugsgebiet innerhalb der nur 6 km breiten Muschelkalkzone ist das Wasserdargebot zu groß, so daß dieses Karstwasser zu einem wesentlichen Teil durch Zusickerung von Oberflächengewässern bzw. von Grundwässern der jungen Talfüllung gespeist werden muß.

5. 2. 3. Die Bregversickerung

Die hydrologisch bedeutendste und damit auch wichtigste Karsterscheinung der Muschelkalkzone im Untersuchungsgebiet stellt die Bregversickerung (Fig. 12) dar. Zwischen Bräunlingen und Hüfingen versickert ein Teil des Bregwassers direkt oder über die kiesige Talfüllung in den klüftigen Trochitenkalken des mo. Die Hauptversickerungsstelle liegt 1,5 km oberhalb von Hüfingen im östlichen Teil des Gewannes Wuhrwies, wo die Breg unmittelbar an den südlichen Talhang herantritt. Weitere Schwinden finden sich flußabwärts bis Hüfingen. Hinzu kommen alte, heute nur noch bei Überschwemmungen

*) Die Donau wird durch den Zusammenfluß von Breg und Brigach gebildet. Auf alten Karten, zum Beispiel von Sebastian Münster, 1550, ist bei Donaueschingen ein ausgedehnter See mit der Bezeichnung „fons Danubii“ eingetragen (W. DEECKE, 1918). Gemeint war damit das damals noch nicht entwässerte, versumpfte Donaueschinger Ried, an dessen Ostende die Donau abfloß. Erst nach Trockenlegung des Riedes erregten die Karstquellen die besondere Aufmerksamkeit, wobei einmal die Juniperusquelle, einmal die Schloßquelle als die Donauquelle betrachtet wurden. Für die Quelle beim Schloß hat diese Bezeichnung zunehmend Verbreitung gefunden, weshalb sie auch im nachfolgenden noch beibehalten wird.



Fig. 12: Die Hauptversickerungsstelle an der Breg oberhalb von Hüfingen im Gewann Wuhrwies. Der Rest des nicht über den Mühlkanal abgeleiteten Wassers versickert im Bereich des Prallhanges (Muschelkalk-Blockschutt) bei niederer und mittlerer Wasserführung vollständig. An dieser Stelle erfolgte die Farbeingabe im April 1971 und die Einspeisung von blaugefärbten Lycopodiumsporen im März 1972.

in Funktion tretende Feldponore im gesamten Talabschnitt. Sie lassen erkennen, daß auch das gesamte Grundwasser in den Schottern der jungen Talfüllung dem Karstkörper zusitzt.

Weitere Versickerungen sollen sich flußaufwärts nördlich von Bräunlingen bei Bruggen befinden (K. ENDRISS, 1908; D. BACKHAUS & U. SANDER, 1967). Trotz mehrfacher Begehungen konnten aber keine Schwinden beobachtet werden. Zudem erscheint es auch von der Geologie her unwahrscheinlich, da dort der Mittlere Muschelkalk ansteht, der, wie ein Quellaustritt (Wasserfassung von Bruggen) nur 10 m über dem Bregbett zeigt, relativ dicht ist.

Heute wird bei Niedrig- und Mittelwasser der gesamte Bregabfluß im Mühlkanal auf der nördlichen Talseite an den Hauptschwinden vorbeigeführt. Am Entlastungswehr werden jedoch unter der Wehranlage ständig 50 bis 150 l/s Wasser durchgedrückt, die dann im Bereich der Hauptschwinde vollständig versickern. Bei stärkerer Wasserführung kann die Versickerungsmenge ein Vielfaches von dem betragen, genaue Langzeitmessungen liegen jedoch nicht vor.

Der Vergleich der beiden benachbarten Bregpegel Hammereisenbach, 17 km oberhalb der Versickerung, und Hüfingen, 2 km unterhalb der Versickerung, ergibt trotz Zuflüssen von der Urach, dem Eisenbach und dem Brändbach zeitweise am Pegel Hüfingen einen verringerten Abfluß, der für einzelne Tageswerte bis zu 2 m³/s unter dem vom Pegel Hammereisenbach liegen kann. Für den Umfang der Bregversickerung lassen sich daraus kaum Rückschlüsse ziehen, wie es D. BACKHAUS & U. SANDER (1967) getan haben, da die großen Differenzbeträge auf den Schwallbetrieb der verschiedenen Mühlen bzw. Wasserwerke zurückzuführen sind. Auch läßt sich in keiner Weise die vielfältige Wechselbeziehung von Fluß- und Grundwasser auf der 17 km langen Flußstrecke, gerade bei langen Trockenwetterperioden, abschätzen.

5. 2. 4. Die Markierungsversuche

Über den Wiederaustritt des westlich von Hüfingen versickernden Bregwassers finden sich in der Literatur verschiedene Vermutungen, doch fehlte bisher ein eindeutiger Nachweis. Aus einem Schreiben der Wasser- und Straßenbauinspektion in Donaueschingen Nr. 6527 vom 27. 12. 1907 (Generallandesarchiv Karlsruhe 237/30753) geht hervor, daß bereits 1887 oder 1888 vom damaligen Kulturinspektor KERLER und 1900 von Ing. SCHILLING jeweils ein Färbversuch durchgeführt wurde. Über die Ergebnisse lagen schon damals bei den zuständigen Behörden keine Unterlagen vor. Das gleiche gilt für einen ebenfalls in dem Schreiben erwähnten Salzungsversuch mit 500 kg Salz, der vom Landesgeologen J. SCHALCH und Ing. SCHILLING 1902 vorgenommen wurde.

K. ENDRISS (1908) sowie W. DEECKE (1918) vermuteten den Wiederaustritt im Wutachtal; sie konnten aber keine genaue Lage der möglichen Wiederaustritte angeben. W. SPITZ (1924) spricht von einer sicheren Verbindung der Versickerung mit den Allmendshofner Quellen (Juniperus- und Gutterquelle), ohne jedoch den Nachweis zu führen. Auch G. WAGNER (1929) deutete eine solche Verbindung an, wobei er auf die geringe, mit dem Flußwasser vergleichbare Härte der Quellwässer hinwies.

Im Rahmen der Planungen für die Wasserversorgung des Doggererzgebietes bei Blumfeld wurde am 10. September 1941 vom Reichsamt für Bodenforschung — Zweigstelle Freiburg (unveröffentlichter Bericht vom 12. 1. 1942) ein weiterer Salzungsversuch unternommen. Zur Salzung wurden 5000 kg Kochsalz der staatlichen Saline Bad Dürrenheim verwendet. In den beobachteten Wasseraustritten im Raum Donaueschingen — Gutter-, Juniperus-, Brauerei-, Donau-, Park- und Buriquelle — sowie in der Burgmühlenquelle im Gauchachtal konnte bei einer zweimonatigen Beobachtungszeit kein erhöhter Chloridgehalt

nachgewiesen werden. Ein direkter Karstweg von der Versickerung zu den Quellen wurde daher ausgeschlossen.

Zur Abklärung der offenen Fragen über den Verbleib des Bregwassers wurden vom Verfasser weitere Markierungsversuche durchgeführt. Bereits die hydrogeologischen Voruntersuchungen erbrachten aufschlußreiche Ergebnisse. So treten in dem in Betracht kommenden Abschnitt der Wutach und Gauchach keine größeren Quellen auf, wie sie eigentlich bei einem bis zur Breg reichenden Einzugsgebiet einschließlich der Versickerung zu erwarten wären. Hingegen zeigen die Quellen im Raum Donaueschingen ein deutliches, mit dem Abfluß der Breg und Brigach korrespondierendes Schüttungsverhalten. Einen wichtigen Hinweis über das nach Süden gerichtete Haupteinzugsgebiet der Quellen ergab der im Abschnitt 5. 2. 2. beschriebene Pumpversuch an der Gutterquelle. Eine Beteiligung der relativ weichen, aus dem Schwarzwald kommenden Flußwässer mußte aber vor allem an einem Teil der Quellen auf Grund der hydrochemischen Befunde angenommen werden (Tabelle 4). Bemerkenswert ist hierbei die deutliche Abnahme der Härte in den Quellwässern bei einem Anstieg des Abflusses in der Breg (Fig. 13).

Ein erster Färbversuch wurde im Frühjahr 1971 durchgeführt. Die hydrologischen Verhältnisse zur Zeit des Versuches waren durch einen kontinuierlichen Rückgang der Abflußmengen gekennzeichnet. Das durch die Schneeschmelze im Schwarzwald bedingte

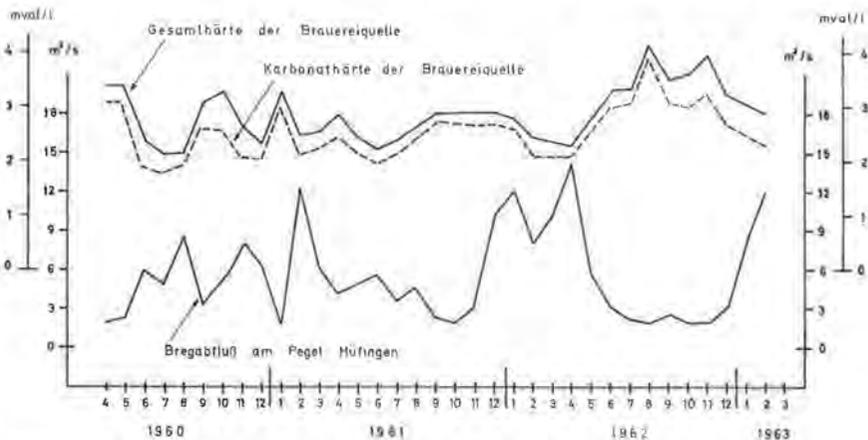


Fig. 13: Die Schwankungen der Gesamt- und Karbonathärte des Wassers der Brauereiquelle in Donaueschingen (nach Unterlagen der Fürstlich Fürstenbergischen Brauerei) im Vergleich zum mittleren monatlichen Abfluß der Breg am Pegel Hüfingen für die Zeit vom April 1960 bis März 1963. Trotz der nur einmal im Monat vorgenommenen Bestimmung der Härte ist eine negativ-korrelate Beziehung zum Bregabfluß deutlich zu erkennen.

Tabelle 4: Chemismus der Quell-, Grund- und Flußwässer im Raum Donaueschingen.

Bezeichnung der Wässer	Tag der Probenahme	Temperatur	pH-Wert	Leitfähigkeit MS bei 16°C	Natrium in µval/l	Kalium in µval/l	Calcium in µval/l	Magnesium in µval/l	Eisen in µval/l	Mangan in µval/l	Chlorid in µval/l	Nitrat in µval/l	Hydrogenkarb. in µval/l	Sulfat in µval/l	Phosphat in µval/l	Kieselsäure in mg/l
Flußwasser																
Breg ober d. Hauptversickerung	30. 10. 70	7,6	7,50	71	161	36	370	80	2	0	160	70	350	103	12	7,32
Breg bei Allmendshofen	30. 10. 70	7,6	7,75	73	152	35	400	213	3	0	155	67	400	166	15	7,80
Brigach oberh. Donaueschingen	2. 11. 70	—	7,00	273	522	118	1.820	640	6	0	535	274	1.800	485	88	7,68
Karstquellen																
Entenfangquelle	14. 11. 70	9,3	6,95	571	78	28	4.820	3.040	0	0	352	319	6.230	999	0	9,60
Quelle in Aufen	29. 8. 70	8,6	7,25	541	65	10	6.140	1.170	0	0	225	63	5.500	1.544	0	6,36
Poststraßenquelle	13. 11. 70	—	7,00	606	317	138	5.240	2.610	0	0	550	710	5.440	1.685	5	9,36
„Donauquelle“	31. 10. 70	11,0	6,90	967	235	28	9.160	4.230	0	0	479	374	5.440	7.365	1	15,00
Parkquelle	30. 10. 70	9,4	7,35	258	152	38	2.150	880	0	0	253	187	2.290	558	6	7,92
Brauerquelle	13. 11. 70	10,0	7,40	279	143	46	2.660	510	0	0	254	155	2.480	477	5	7,56
Gutterquelle	31. 10. 70	9,4	7,45	228	148	41	2.300	640	1	0	211	149	2.350	467	6	8,04
Buriquelle West	31. 10. 70	9,3	7,45	222	139	36	2.240	600	1	0	211	119	2.400	345	6	8,04
Juniperusquelle	31. 10. 70	9,6	7,20	329	143	37	2.960	1.200	1	0	268	258	3.020	772	4	8,16
Brunnen im Muschelkalk																
Brunnen Wirth N	20. 11. 70	—	6,95	511	187	28	4.100	2.740	0	1	423	310	5.580	726	0	9,36
Brunnen Wirth S	20. 11. 70	—	6,90	505	148	31	4.460	2.640	0	0	338	355	5.900	704	0	8,88
FF Sägewerk Hüfingen	20. 11. 70	—	7,00	499	162	23	4.260	2.340	0	0	338	458	5.160	849	0	8,16
WV Hüfingen	26. 11. 70	—	6,95	341	143	36	2.950	1.870	0	0	268	329	3.580	454	0	10,80
Brunnen W heim Flugplatz	20. 11. 70	—	6,70	982	338	29	9.440	3.700	0	0	634	264	5.320	7.438	0	16,20
Grundwasser in den Kiesen																
Kiesgrube W von Hüfingen	30. 10. 70	8,9	9,30	142	165	54	930	90	4	0	197	17	850	213	13	2,94
alte Kiesgrube E Hüfingen an der Breg	30. 10. 70	9,5	7,40	887	169	56	800	440	15	0	197	53	720	454	22	8,28
oberer Baggersee Wurholz	31. 10. 70	9,4	5,10	1.024	252	77	10.500	3.510	5	0	366	16	30	13.900	4	2,28
unterer Baggersee Wurholz	31. 10. 70	9,9	6,30	822	226	49	8.040	2.720	16	0	338	19	180	10.498	6	14,28
Quellen aus dem Keuper																
alte WV Hüfingen	30. 10. 70	9,1	7,35	1.994	209	54	28.200	3.410	2	0	268	31	6.240	24.704	2	10,20

Hochwasser der Breg erreichte Ende März seinen Höhepunkt, danach nahm die Wasserführung laufend ab. Die gleiche Tendenz herrschte auch im Karstwasserkörper. Mitte März erreichte der Wasserstand ein Minimum, bis Anfang April hatte sich der Karstwasserkörper wieder weitgehend aufgefüllt, und die Quellschüttung erreichte ein Maximum. Danach ging die Ergiebigkeit bis in den Mai hinein laufend zurück. Allein zwischen 1. und 15. April nahm die Schüttung der Karstquellen um etwa die Hälfte ab.

Die Farbeingabe erfolgte am 8. April 1971 (13.55 bis 14.15 Uhr) im Bereich der schon beschriebenen Hauptversickerung am rechten Ufer unmittelbar unter dem Steilhang (Fig. 12). Es wurden 5 kg vorgelöstes Uranin a. p. MERCK verwendet.

In die Beobachtung einbezogen waren insgesamt 22 Quellen und Brunnen, ferner einzelne Kiesgruben sowie das Wasser der Breg und Gauchach kurz vor deren Einmündung. In der Tabelle 5 sind die genauen Bezeichnungen der Beobachtungsstellen sowie der Beprobungsrhythmus festgehalten. Die Beobachtung erfolgte sowohl durch Direktbeprobung als auch mit Aktivkohlebeuteln nach F. BAUER (1967).

Die Untersuchung auf den Uraningehalt erfolgte mit der Fluoreszenzeinrichtung zum ZEISS-Spektralphotometer PM Q II (W. KÄSS, 1964, und F. BAUER, 1967). Hierbei kam als Lichtquelle eine Wolframlampe 6 V/5 A und als Anregungsfilter das SCHOTT-Doppelbandinterferenzfilter DEPAL mit 486 nm zur Verwendung. Die Registrierung des Spektrums zwischen 600 und 500 nm wurde mittels eines SERVOGOR-Potentiometerschreibers aufgenommen. Bei der angegebenen Meßvorrichtung konnten Uraningehalte des Quellwassers von 0,02 mg/m³ direkt und über das Eluat von 0,005 mg/m³ nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse des Färbversuches sind in der Tabelle 6 zusammengefaßt. In den nicht aufgeführten Beobachtungsstellen konnte kein Uranin nachgewiesen werden. Ergänzend sind auf Fig. 14 die durch Direktmessung sowie auf Fig. 15 die aus den Eluaten der Aktivkohle ermittelten Durchgangskurven dargestellt. Auf Fig. 16 sind die beobachteten Abflußrichtungen eingetragen. Der erste Farbaustritt wurde am 10. April um 8 Uhr in der Gutterquelle festgestellt. Bei einer Entfernung von 3,9 km und einer Laufzeit von 41 Stunden ergibt sich eine Abstandsgeschwindigkeit von 95 m/h. Die zugehörige Höhendifferenz beträgt nur 11 m, was einem Gefälle von 2,8 Promille entspricht. Die maximale Uraninkonzentration mit 25 mg/m³ trat in der Gutterquelle 54 Stunden nach der Farbeingabe auf, so daß sich für den Hauptdurchgang eine Geschwindigkeit von 72 m/h errechnet. Bei den übrigen Quellen ergab sich trotz der fast gleichen Entfernung von der Bregversickerung eine zunehmende Verzögerung, je weiter im Westen die einzelnen Wasseraustritte liegen. Die Gesamtausbringung dürfte in dem beobachteten Zeitraum vom 8. April bis 11. Mai kaum 40 Prozent der eingegebenen Farbmenge erreicht haben.

Tabelle 5: Verzeichnis der Beobachtungsstellen.

Nr.	Name	Rechtswert	Hochwert	Art der Beprobung*)
1	Poststraßenquelle	3462680	5312640	A
2	„Donauquelle“	3462910	5312730	A, D
3	Parkquelle	3463010	5312610	A, D
4	Schwanenteichquelle	3463125	5312435	A
5	Bohrung Oberer Weiher	3462920	5312305	L
6	Brauereiquelle	3463395	5312030	A, D
7	Wasseraustritt neben Brauereiquelle	3463395	5312020	D
8	Gutterquelle	3463525	5311900	A, D
9	Neuer Brunnen der Stadt Donau- eschingen bei der Gutterquelle	3463525	5311905	A
10	Buriquelle, Ost	3463510	5311800	S
11	Buriquelle, West	3463335	5311850	A
12	Wasseraustritt im Bregbett	3463315	5311910	S
13	Quelle links der Breg oberhalb der Eisenbahn	3463300	5311910	S
14	Quelle links der Breg oberhalb der Eisenbahn	3463305	5311900	S
15	Juniperusquelle	3462905	5311680	A, D
16	Schlagbrunnen der Fa. Biedermann	3462800	5311940	S
17	Tiefbrunnen der Fa. Wirth, Nord	3462580	5311205	A, D
18	Tiefbrunnen der Fa. Wirth, Süd	3462415	5311120	L
19	Tiefbrunnen des F. F. Sägewerkes Hüfingen	3461940	5310610	A, D
20	Tiefbrunnen der Stadt Hüfingen	3461470	5310260	A, D
21	Alter Brunnenschacht am Bahndamm	3464140	5311670	L
22	Wurholzbrunnen	3464830	5311080	S
23	Kiesgrube westlich Wurholz	3464130	5310550	S
24	Doline Nordost Hüfingen	3463010	5310710	S
25	Breg vor dem Zusammenfluß mit der Brigach	3464100	5312570	L
26	Kiesgrube westlich Hüfingen	3461220	5309350	S
27	Burghaldenquelle in der Gauchach- schlucht	3457880	5303360	L
28	Quelle 800 m unter Burgmühle, Gauchachschlucht	3457830	5302510	L
29	Gauchach vor Einmündung in die Wutach	3458000	5302050	L

*) A: Aktivkohle 8.—15. 4. täglich, 15. 4.—11. 5. wöchentlich gewechselt
L: Aktivkohle-Langzeitbeobachtung, Wechsel wöchentlich
D: Direktbeprobung 8.—15. 4. 3mal täglich, 15. 4.—11. 5. 1mal wöchentlich
S: nur Stichproben

Tabelle 6: Übersicht über die von der Uranineingabe am 8. April 1971 im Bereich der Bregversickerung betroffenen Wasseraustritte.

Beobachtungsnummer	Bezeichnung der Wasseraustritte	Entfernung zur Eingabestelle in km	Höhe über NN in m	Höhenunterschied zur Eingabestelle in m	l. Nachweis nach Stunden	m/Std.	Maximum nach Stunden	m/Std.	Höchste Konzentration in mg/m ³	Schüttung (geschätzt) in l/s
1	Poststraßenquelle	3,9	674,5	12,5	~ 65	60	~ 90	43	~ 0,1—0,4	25
2	„Donauquelle“	4,1	678	9	56	73	66	62	0,7	40
3	Parkquelle	4,05	674	13	52	78	63	64	9,6	200
4	Schwanenteichquelle	4,0	674	13	52	78	60	66	~ 10	50—100
5	Bohrung oberer Weiher	3,75	676	11	?		?		~ 8	
6	Brauereiquelle	3,9	676	11	49	80	58	67	24	25
7	Nebenquelle bei Brauereiquelle	3,9	676	11	48	81	58	67	15	5
8	Gutterquelle	3,9	676	11	41	95	54	72	25	150—200
9	Neuer Brunnen der WV Donaueschingen	3,9	676	11	~ 41	95	~ 54	72	~ 15—25	n. gepumpt
10	Buriquelle Ost	3,85	676	11	~ 41	95	~ 54	72	~ 15—25	20
11	Buriquelle West	3,80	676	11	~ 41	95	~ 54	72	~ 15—25	30
12	Quelle im Bregbett	3,8	674,5	12,5	?		~ 56	70	~ 15—25	
13	nördliche Quelle li Breg	3,8	676	11	?		~ 56	70	~ 15—25	2
14	südliche Quelle li Breg	3,8	676	11	?		~ 56	70	~ 15—25	5
15	Juniperusquelle	3,35	678,5	8,5	43	76	56	60	8,3	120

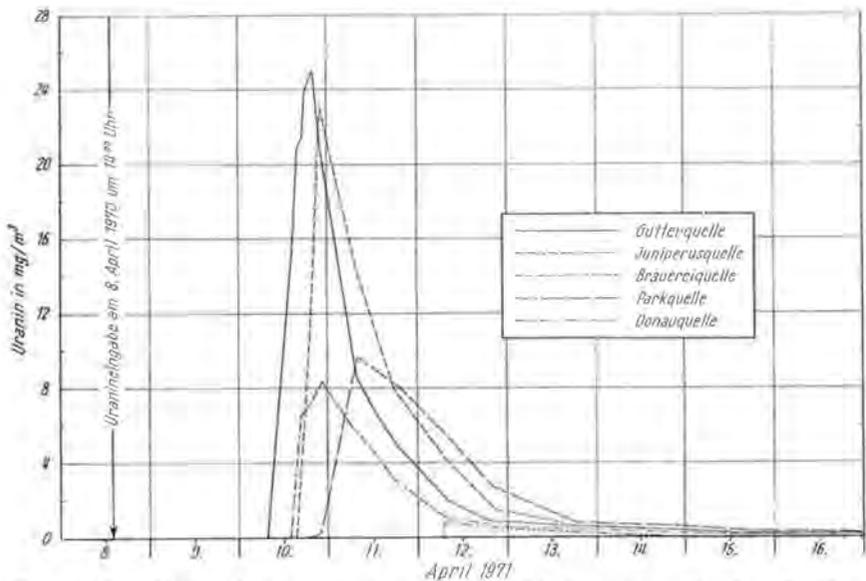


Fig. 14: Der Uranindurchgang aufgrund der Direktmessung in den Quellen im Raum Donaueschingen—Allmendshofen anlässlich des Färbversuches im April 1971.

Der Färbversuch erbrachte zum ersten Mal den direkten Nachweis einer unterirdischen Verbindung von der Bregversickerung zu den Karstquellen im Raum Donaueschingen. Das Ergebnis war, was den Farbhauptaustritt in den Quellen südlich der Brigach betrifft, nicht überraschend, sondern bereits auf Grund der angeführten hydrogeologischen Voruntersuchungen zu erwarten gewesen. Die Beobachtungsstellen 3 bis 15 (Tabelle 6 und Fig. 16) können daher einem einheitlichen, im wesentlichen vom versickernden Bregwasser alimentierten Karstwasserkörper zugeordnet werden, dessen Hauptentwässerung im Bereich zwischen Park- und Gutterquelle liegt. Die am weitesten im Südwesten in Richtung zur Bregversickerung und damit auch am höchsten gelegene, intermittierende Juniperusquelle stellt heute nur mehr einen bei Mittel- und Hochwasser genutzten Auslauf dar. Sie schüttete am Beginn des Versuchs bei hohem Karstwasserstand über 100 l/s, fiel aber mit dem Absinken des Karstwasserspiegels Anfang Mai völlig trocken.

Überraschend kam der Farbaustritt in der links von der Brigach gelegenen Donau- und Poststraßenquelle. Auf Grund der gegenüber den Wasseraustritten südlich der Brigach höheren Mineralisation, insbesondere des hohen Sulfatgehaltes (Tabelle 4), war zunächst für die beiden Quellen ein völlig getrenntes, im wesentlichen wohl nördlich der Brigach gelegenes Einzugsgebiet angenommen worden. Durch

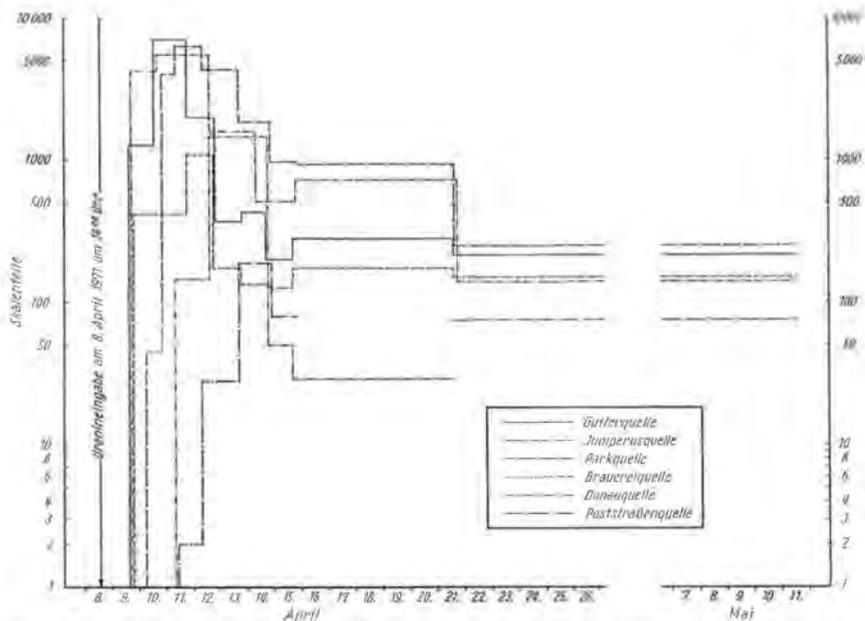


Fig. 15: Uranindurchgang in den Quellen im Raum Donaueschingen—Allmendshofen nach den aus der Aktivkohle (Methode F. BAUER, 1967) gewonnenen Eluaten. Die Längen der horizontalen Linien geben die Einhängenzeiten der Aktivkohlebeutel an.

den Uraninnachweis konnte jedoch bewiesen werden, daß die Karstbereiche nördlich und südlich der Brigach unter der mit quartären Schottern und zum Teil auch tonigen Schichten gefüllten 10 bis 15 m tiefen Brigachrinne zusammenhängen.

Die auf der direkten Verbindungslinie zwischen den genannten Quellen und der Bregversickerung gelegenen Bohrbrunnen, die ebenfalls Karstwasser fördern, wurden von der Farbgebung nicht betroffen. Dies, obwohl der südlichste, nämlich der Tiefbrunnen der Stadt Hüfingen, nur 1,3 km von der Hauptschwinde entfernt ist. Ein Zusammenhang mit dem westlich der Hauptschwinden in den Karstkörper abfließenden Talgrundwasser ist zu vermuten.

Wichtige Folgerungen ergeben sich für die Erschließung des Karstwassers sowie für die Absicherung der bestehenden Fassungen im Raum Donaueschingen. Durch den Färbversuch konnte zunächst die primäre Frage nach der Herkunft zumindest eines großen Teils des Wassers beantwortet werden. Bestätigt wurde auch der durch den Pumpversuch an der Gutterquelle 1969 deutlich gewordene enge Zusammenhang der verschiedenen Karstquellen und die Zuordnung zu einem einheitlichen Karstwasserkörper. Für die weitere Erschließung bedeutet dies eine gewisse Einschränkung, besonders zum Schutz der

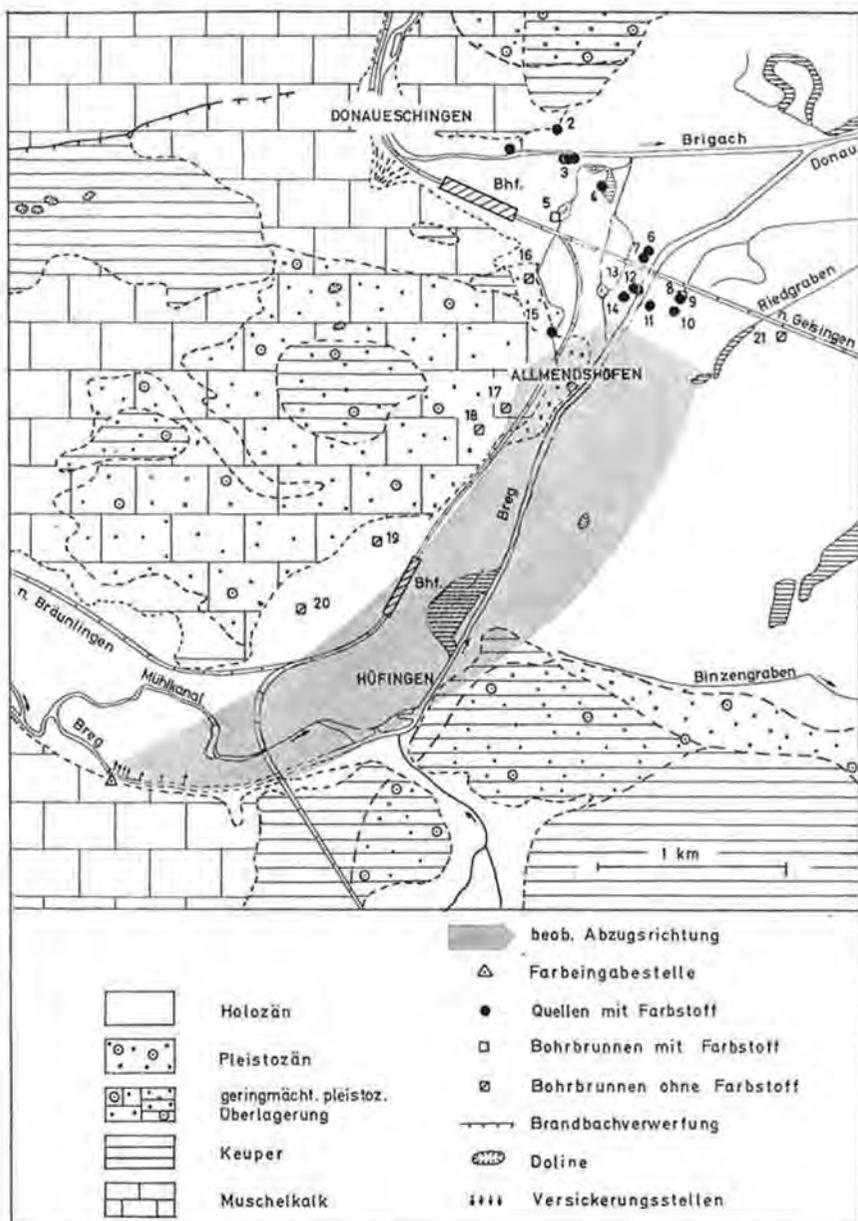


Fig. 16: Geologische Übersichtsskizze des Versuchgebietes im Bereich der Bregversickerung mit den beim Färbversuch im April 1971 erzielten Ergebnissen.

noch bestehenden Oberflächenfassungen. Im übrigen dürfte das Wasserdargebot des Karstkörpers im Raum Donaueschingen—Hüfingen mit den heutigen Entnahmen von rund 200 l/s erst zur Hälfte ausgenützt sein.

Ergänzend zu dem beschriebenen Färbversuch vom April 1971 wurde im März 1972 zur Abgrenzung des Einzugsgebietes der Karstquellen im Raum Donaueschingen ein kombinierter Markierungsversuch durchgeführt. Im Bereich der vermuteten Karstwasserscheide zwischen Breg- und Wutachsystem wurde zwei Kilometer südlich von Bräunlingen in einem für die Versickerung von häuslichen Abwässern verwendeten Schacht des Gehöftes Schwörer (r 34 58560 h 53 08480) 5 kg Uranin a. p. MERCK eingebracht. Gleichzeitig gelangten in einem Versickerungsschacht des Gehöftes Schreiner (r 34 62080 h 53 14920) an der Straße Donaueschingen—Grüningen 5 kg Sulforhodamin G extra zur Einspeisung. Von dieser Stelle konnte angenommen werden, daß sie an der Nordgrenze des Einzugsgebietes der Donaueschinger Karstquellen liegt. Zum besseren Vergleich mit dem Färbversuch im Frühjahr 1971 wurde auch die Hauptschwinde an der Bregversickerung mit 8 kg blaugefärbten Lycopodiumsporen neuerlich beschickt.

Die Einbringung der Markierungsstoffe erfolgte am 29. März 1972. Trotz einer teilweise bis in den Herbst durchgeführten Beobachtung der in Frage kommenden Wasseraustritte, konnte der Wiederaustritt der drei Tracer nirgends nachgewiesen werden. Zur Erklärung dieses negativen Ergebnisses, besonders im Vergleich zu dem ein Jahr zuvor durchgeführten Färbversuch, muß man sicherlich zunächst einmal die extremen Witterungsverhältnisse heranziehen. Der Einspeisung ging eine zweimonatige, fast niederschlagsfreie Periode voraus, die zusammen mit dem winterlichen Niedrigwasser zu einem extrem niederen Abfluß in der Breg und zu einem ausgeprägten Minimum des Karstwasserstandes führte. Das Wasser im Bregbett versickerte bereits vor der Hauptschwinde vollständig. Es wäre denkbar, daß bei so niederem Karstwasserstand die unterirdische Abflußrichtung gegenüber den Ergebnissen des Färbversuches 1971 sich stärker nach Osten verschiebt und das Karstwasser in die junge Schotterfüllung des Donaueschinger Riedes übertritt. Eine endgültige Klärung können erst weitere, bei verschiedenen Karstwasserständen durchzuführende Markierungsversuche bringen.

5. 3. Das Schichtstufenland des Keupers, Lias und Doggers

Die Gesteinsfolgen der Oberen Trias sowie des Unteren und Mittleren Jura unterscheiden sich in ihren hydrogeologischen Eigenschaften nur geringfügig. Durch das Vorherrschen von Tonen und Mergeln ist ihre Wasseraufnahmefähigkeit beschränkt. Grundwasserträger sind die

meist nur geringmächtigen, sandigen, kalkigen und dolomitischen Einschaltungen. Auf der hydrogeologischen Übersichtskarte Tafel II wurden die genannten Schichten mit einheitlicher Signatur ausgeschieden. Die von dieser Gesteinsfolge aufgebauten Gebiete — Teile der Baar und das Alvorland — sind für die Grundwassergewinnung wenig ergiebig. Die Erschließung größerer Wassermengen ist nicht oder nur mit großem Aufwand möglich.

5. 3. 1. Der Keuper

Die vorwiegend mergeligen Sedimente des Keupers bilden eine nur wenig durchlässige, für die Ausbildung von größeren Grundwasserkörpern ungeeignete Gesteinsfolge. Von Nachteil erweist sich das Fehlen mächtiger Sandsteinkomplexe, wie sie z. B. in Nordost-Württemberg dem Unteren und Mittleren Keuper eingeschaltet sind.

Die größte Quelledichte beobachtet man im Bereich des Lettenkeupers. Dieser nimmt auf der Muschelkalkstufenlehne weite Flächen ein, so daß ihm auch ein relativ großes Einzugsgebiet zukommt. Die Quellen, deren Schüttung 0,05 bis 1 l/s beträgt, liegen entweder im Bereich der flach in die Stufenlehne eingetieften Rinnen, wobei sie an den Ausstrich einzelner sandiger Einschaltungen gebunden sind, oder sie treten überhaupt erst an der Überlagerungsgrenze zum Gipskeuper auf. Hier bilden die Grenzdolomite den Grundwasserleiter.

Der Gipskeuper ist im allgemeinen wasserundurchlässig. Seine Ausstrichzone wird besonders in Talmulden von weiten Sumpfwiesen eingenommen. Bei größeren Mächtigkeiten der Gipseinschaltungen können durch Auslaugung karstartige Hohlräume entstehen. Damit zusammenhängende Quellen erreichen zum Teil Schüttungen von 2 l/s und mehr. Für die Verwendung als Trink- und Brauchwasser eignen sich diese Wässer auf Grund des hohen Sulfatgehaltes nur wenig.

Schilfsandstein und Stubensandstein bilden zwar im Bereich der Keuperstufe östlich von Bad Dürkheim schwach ausgeprägte Quellhorizonte, doch kommt ihnen auf Grund ihrer geringen und schwankenden Mächtigkeiten nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Entsprechend variieren auch die Schüttungen der Quellen, die zwischen 0,1 und 1 l/s betragen können. Zur Trinkwassergewinnung werden einzelne Wasseraustritte aus dem Schilfsandstein, zum Beispiel bei Hochemmingen nordöstlich von Bad Dürkheim, genutzt. Praktisch undurchlässig sind die Bunten Mergel sowie die den Abschluß der Keuperzone bildenden Knollenmergel.

5. 3. 2. Der Untere und Mittlere Jura

Lias und Dogger zeigen in Bezug auf Wasseraufnahmevermögen, Wasserführung und Ausbildung von Quellhorizonten weitgehende Übereinstimmung und unterscheiden sich gegenüber dem Keuper vor allem in dem andersgearteten Chemismus der Grundwässer. Der häufig-

fige Gesteinswechsel bedingt bei Vorherrschen von tonigen und mergeligen Schichten das Auftreten mehrerer, meist an die klüftigen Kalk-einschaltungen gebundener Grundwasserstockwerke (Fig. 17). Wegen ihrer geringen Mächtigkeit sowie infolge ihrer meist kleinen Einzugsgebiete — einzelne wasserleitende Schichten streichen nur in schmalen Zonen am Fuß des Albraufes aus — ist die Wasserführung relativ gering. Bei der starken Zertalung und der damit verbundenen wiederholten Zerschneidung der Wasserträger sind zwar die Quellen zahlreich, die jeweils ausströmende Wassermenge ist jedoch meist sehr gering.

Das bedeutendste Grundwasserstockwerk innerhalb des Unteren und Mittleren Jura bildet der Lias α . Zahlreiche Quellen treten an seiner Basis über dem undurchlässigen Knollenmergel des Mittleren Keupers auf. Wasserführend sind vor allem die Arietitenkalke und der Angulatensandstein sowie geringmächtige, klüftige Kalklagen. Im einzelnen sind daher mehrere Quellhorizonte zu unterscheiden. Der Lias α verfügt durch das flächenhafte Auftreten auf der Keuperstufen-



Fig. 17: Der Mittlere Dogger im Rutschungsanriß auf der Westseite des Eichberges bei Blumberg. Das Vorherrschen von Tonen, Tonmergel und Mergel bestimmt die relativ ungünstigen hydrologischen Verhältnisse im Bereich dieser Schichten. Die Grundwasserführung ist im wesentlichen auf die geringmächtigen Kalk-einschaltungen (siehe Foto) im oberflächennahen Bereich beschränkt.

lehne über ein relativ großes Einzugsgebiet. Die Quellen entspringen sowohl an der Stirn der Schichtstufe, wie die Wasseraustritte am Ursprung der Stillen Musel (1,5 l/s), als auch im Bereich der Stufenlehne, wie die von Sunthausen bzw. Biesingen genutzten Quellfassungen (bis zu 2 l/s).

Im Mittleren und Höheren Lias können aus den wenigen Mergelkalklagen einzelne Quellen austreten. Ihre Schüttung überschreitet jedoch kaum 0,3 l/s, vielfach bleibt sie sogar unter 0,1 l/s, wobei die Quellen häufig schon nach kurzen Trockenwetterperioden versiegen. Die Wässer aus den Kalklagen zwischen den Ölschiefern des Lias ε können zudem noch Schwefelwasserstoff enthalten, so daß eine Verwendung für Trinkwasserzwecke überhaupt ausscheidet.

Der bis zu 100 m mächtige, aus Tonen bestehende Dogger α , der im Untersuchungsgebiet vor allem zwischen Tunningen und Spaichingen eine große Verbreitung hat, ist praktisch wasserundurchlässig. Das Niederschlagswasser fließt vorwiegend oberirdisch ab, kann aber auch von dem oberflächennahen Auflockerungsbereich aufgenommen werden, der es nach Quellung der Tone nur langsam wieder abgibt. Sumpfwiesen, besonders in den flachen Talmulden, sind daher weit verbreitet. Heute ist man sehr bemüht, diese durch Gräben bzw. durch Rohrdrainagen zu entwässern, um das Gelände in verstärktem Maße für die Landwirtschaft nutzbar zu machen.

Über dem Dogger α treten einzelne Quellen aus den Mergelkalk-Zwischenlagen des Dogger β (zum Beispiel Murchisoniaeschichten) bzw. des Dogger γ (Sowerbyi-Oolith, Blaukalke) aus. Die einzelnen Grundwasserhorizonte des Oberen Doggers sind vorwiegend an Einschaltungen von Oolithen gebunden. Am Fuße des Albtraufes ausstreichend haben sie meist nur ein kleines Einzugsgebiet. Die Schüttung der Quellen beträgt im allgemeinen zwischen 0,1 und 0,7 l/s. Zur Trinkwassergewinnung werden sie relativ wenig verwendet, da man meist den ergiebigeren Quellhorizont an der Basis des Weißen Jura nutzt.

5. 4. Die westliche Schwäbische Alb

5. 4. 1. Hydrogeologische Eigenschaften der Gesteinsfolge

Von dem untersuchten Einzugsgebiet der obersten Donau gehört fast die gesamte östliche Hälfte zur Schwäbischen Alb. Sie stellt eine weite, nur flach nach Süden geneigte Hochfläche dar, die von wenigen tiefen Tälern zerschnitten wird. Am Aufbau sind alle Schichten des Weißen Jura vertreten. Durch ihre intensive Verkarstung geben sie dieser Landschaft ein charakteristisches Gepräge.

Die unterirdische Entwässerung der Albhochfläche folgt bevorzugt der Schichtneigung nach Süden. Vorfluter für das ausgedehnte Karstgebiet sind in erster Linie die Donau und ihre tief eingeschnit-

tenen Zuflüsse. Bedingt durch die tiefere Erosionsbasis erlangen jedoch im Süden die dem Hochrhein tributären Gerinne sowie im Norden die Zuflüsse des Neckars eine immer größere Bedeutung. Die Abgrenzung der unterirdischen Einzugsgebiete ist schwierig und meist nur mittels Markierungsversuchen möglich.

Trotz der Aufeinanderfolge einzelner mergeliger und kalkiger Komplexe stellt die gesamte Malmfolge einen hydrologisch zusammenhängenden Karstkörper dar (H. HÖTZL und A. SCHREINER in H. BATSCHKE et al., 1970). Den Mergeln kommt im Untersuchungsgebiet bei weitem nicht jene Bedeutung als Stauhormont zu, die sie vergleichsweise im Bereich der mittleren Schwäbischen Alb innehaben, wo sie zu einer Untergliederung des Karstkörpers Anlaß geben (F. WEIDENBACH, 1954, und E. VILLINGER, 1972). Ein hoher CaCO_3 -Anteil, häufiger Fazieswechsel und eine teilweise starke Zerklüftung verhindern, daß die Mergellagen als weiträumige Stauhormonten wirksam werden.

Die Sohlschicht der Verkarstung bilden die Oxfordmergel, an deren Obergrenze das Auftreten mehrerer größerer Quellen im Donautal gebunden ist. Je nach Anteil der Kalkeinschaltungen kann dieser basale Mergelkomplex zum Teil selbst verkarstet sein, so daß die Quellen erst an seiner Unterkante, unmittelbar über den Dogger-



Fig. 18: Die gutbankten und geklüfteten Oxfordkalke (Weißjura β) im Bereich des Donautales bei Möhringen, unweit den Hauptversickerungsstellen an der Donau.

schichten, austreten. Der eigentliche Karstkörper wird von den mächtigen, gebankten Oxfordkalken (Fig. 18) und den meist massigen Kalken des Kimmeridge (Fig. 19) aufgebaut. Die Stauwirkung der zwischengeschalteten Kimmeridgemergel ist nur gering. Die in der vertikalen Abfolge durchgehenden, verschwammten kalkigen Partien und die ebenfalls schon angeführte Zerklüftung bieten dem Wasser genügend Durchtrittsmöglichkeiten, so daß sich nur vereinzelt engbegrenzte Karstwasserkörper im Hangenden dieser Mergel ausbilden können. Den obersten mergeligen Komplex bilden die Zementmergel des Tithons. Sie sind im Norden bereits weitgehend erodiert und treten nur noch im Süden lokal als Quellhorizont hervor.

Die nach dem Südosten und Süden abtauchende Jurafolge wird am Südrand der Schwäbischen Alb von den wasserundurchlässigen Sedimenten der Molasse überlagert. Sie decken den Karstkörper in Art einer Dichtungsschürze ab. Allerdings ist diese im Hegau durch die junge rheinische Tiefenerosion bereits bis weit unter das heutige Talniveau zerschnitten.

Infolge der tiefeingeschnittenen Täler ist der Albbereich in einzelne mehr oder weniger voneinander getrennte, hydrologisch selbständige Karstbereiche zu gliedern. Da die Donau fast im gesamten



Fig. 19: Die massigen Kimmeridgekalke (Weißjura [δ + ε]) mit den zum Teil stotzenförmig herauswitternden „Algen-Schwamm-Riffen“; Donautal bei Beuron.

Albabschnitt als Vorfluter wirksam ist, können wir zunächst einen nördlichen und südlichen Bereich unterscheiden, wobei jeder wieder aus einzelnen, voneinander unabhängigen Karstkörpern mit zum Teil unterschiedlicher Entwässerungsrichtung und unterschiedlichem Abflußverhalten besteht.

5. 4. 2. Das Karstgebiet nördlich der Donau

Die Malmplatte im Norden der Donau wird durch die teilweise bis in den Dogger eingeschnittenen Täler in einzelne, voneinander isolierte Blöcke zerschnitten. Den Teil westlich des Faulenbaches bauen fast ausschließlich die Schichten des Unteren Malm, die Oxfordmergel und -kalke auf. Die Verkarstung reicht dort vereinzelt bis zur Basis der kalkigen Mergel. Karstquellen treten vor allem im Bereich der Hänge über der ausstreichenden Sohlschicht auf. In dem anschließenden Donautal sind Quellen selten, das Karstwasser dürfte im Abschnitt zwischen Kirchen-Hausen und Immendingen direkt oder über den Hangschutt in die Talfüllung übertreten. Zwischen Immendingen und Möhringen, wo infolge der Absenkung der Schichten an der Immen-dinger-Flexur die Sohlschicht der Verkarstung durch die Tiefenerosion nicht erreicht wurde und daher die Karstgebiete nördlich und südlich der Donau noch miteinander verbunden sind, erfolgt die Entwässerung in den Kalken unter dem Donautal hindurch nach Süden. Erst östlich von Möhringen liegt die Verkarstungsbasis wieder im Talniveau, so daß dort einzelne Quellen auftreten bzw. das Karstwasser in die junge Talfüllung übertritt.

Auf Grund der starken Zertalung kommt den einzelnen Quellen jeweils nur ein kleines Einzugsgebiet zu, ihre Schüttung ist relativ gering und liegt nur vereinzelt über 5 l/s. Da das Einzugsgebiet fast durchwegs bewaldet ist, ist das Karstwasser hygienisch einwandfrei. Einzelne Quellen sind für die Wasserversorgung der nahegelegenen Gemeinden (zum Beispiel für Geisingen im Wildtal 7 Quellen mit einer Schüttung von 0,3 bis 2 l/s) gefaßt.

Von größerer Einheitlichkeit ist der Karstkörper zwischen Faulenbach und Bära. An seinem Aufbau sind auch bereits die Schichten des Mittleren und Oberen Malm beteiligt, die vor allem die Hochfläche einnehmen. Die hier weitgehend die Basis der Verkarstung bildenden Oxfordmergel stehen im Donautal zwischen Tuttlingen und Mühlheim im Bereich der Talsohle an. Dort treten unter anderem die Papiermühlenquelle nordöstlich von Tuttlingen mit 8 bis 30 l/s, die Kesselbachquelle nördlich von Nendingen mit 100 bis 300 l/s und die Wulfbachquelle nördlich von Mühlheim mit 30 bis 150 l/s zutage. Für die Wasserversorgung genutzt werden Quellen im oberen Bäratal, bei der Lippbachmühle und im unteren Ursental.

Die genannten Karstwasseraustritte sind im wesentlichen an die Sohlschicht der Verkarstung und weniger an das Vorflutniveau der

Donau gebunden (Seichter Karst). Dies zeigt sich in der Beobachtung, daß in dem von Norden einmündenden Ursen- und Lippbachtal die großen Quellen ebenfalls im Hangenden der Oxfordmergel auftreten, ihre Wässer aber zum Teil bei Erreichen des Donautales in den Schottern versitzen. Grundwasserbeobachtungen im Donautal bei Tuttlingen (K. C. BERZ, 1928) ergaben, daß ein Teil dieses Wassers über die junge Talfüllung in den südlich anschließenden Karstkörper abfließt.

Der größte zusammenhängende Karstkörper im Untersuchungsgebiet erstreckt sich zwischen Bära und Schmeie (im Oberlauf Schmiecha genannt). Für seinen nördlichen Teil, die Ebinger Alb, liegen eingehende karsthydrologische Untersuchungen von G. STRAYLE (1970) vor. Durch zahlreiche Markierungsversuche konnte er auch die Abflußrichtungen im gesamten, ausgedehnten Bereich zwischen Bära und Schmeie (Tafel II) sowie die sich überschneidenden Einzugsgebiete der großen Quellen abgrenzen.

Entsprechend der unterirdischen Abflußrichtung tritt das Karstwasser vor allem am Südrand des Karstkörpers im Donautal zutage. Im Gegensatz zum Bereich westlich der Bära ist die Karstentwässerung infolge des Tiefganges des Karstkörpers nicht an den Ausstrich seiner Sohlschicht, sondern an das Vorflutniveau der Donau gebunden (Tiefer Karst). Die größten dieser Quellen, die sowohl aus den Oxford als auch weiter im Osten aus den Kimeridgekalken austreten, sind die Biselliquelle bei Beuron mit 80 bis 400 l/s, der Großschmiedebrunnen, der mit durchschnittlich 200 bis 800 l/s und einer maximalen Schüttung von über 4 m³/s den größten Wasseraustritt in diesem Abschnitt des Donautales darstellt, ferner der Langenbrunn mit 20 bis 180 l/s, die Schloßquelle Werenwag mit 10 bis 40 l/s, die Dorfquelle in Hausen im Tal mit 40 bis 250 l/s, der Weiherbrunnen mit 20 bis 60 l/s, die Talmühlenquelle in Unterneidigen mit 150 bis 360 l/s sowie der Jörgenbrunnen mit 50 bis 1000 l/s. Die Schüttungsangaben sind den Arbeiten von G. ANDRES & D. PFEIFFER (1955), W. HAHN (1968) und G. STRAYLE (1970) entnommen. Biselliquelle, Großschmiedebrunnen und der Langenbrunn werden von den Wasserversorgungsgruppen der Albhochfläche genutzt.

5. 4. 3. Das Karstgebiet südlich der Donau

Im äußersten Westen gehören hierzu die Reste des Oberen Jura auf dem Eichberg und dem Buchberg. Erhalten sind nur noch die Mergel und Kalke des Oxfords. Als StauhORIZONT wirken die darunterliegenden Doggertone. Infolge der kleinen Einzugsgebiete sind aber die Quellen nur unbedeutend; genutzt werden sie am Südhang des Eichberges für die Stadt Blumberg.

Ein ausgedehnteres, aber ebenfalls nur von den Schichten des Unteren Malm aufgebautes Karstgebiet stellt der Höhenzug der Länge zwischen dem Donautal im Norden und dem Aitrachtal im Süden dar.

Sowohl am Nord- als auch Westrand treten an der Basis des Weißen Jura einzelne Überlaufquellen mit einer Schüttung von 0,3 bis 3 l/s auf, die für die Wasserversorgungen von Gutmadingen, Neudingen, Fürstenberg und Hondingen gefaßt sind. Die Hauptentwässerung erfolgt jedoch nach Süden zum Aitrachtal, wo das Karstwasser direkt in die kiesige Talfüllung übertritt (s. Abschnitt 5. 6.).

Das Gebiet südlich der Aitrach ist weitgehend von der tertiären Juranagelfluh überdeckt; nur im Bereich der tieferen Talhänge stehen Oxfordkalke und Kimmeridgemergel an. Quellaustritte sind nur aus dem nordöstlichen Bereich bei Kirchen-Hausen und Hintschingen bekannt. Da südlich von Kirchen-Hausen aus den Kalken der rechten Talseite keine Quellen austreten, ist auch für dieses Karstwasser ein Übertritt in die Kiesfüllung des Aitrachtales (s. Abschnitt 5. 6. 1.) anzunehmen; möglich wäre auch ein Zusammenhang mit den in den tief eingeschnittenen westlichen Hegautälern bei Tengen, südlich von Watterdingen sowie westlich von Zimmerholz austretenden Karstquellen.

Eine Sonderstellung nimmt der östlich der Linie Zimmern—Stetten/Neuhöwen anschließende, bis etwa zur Linie Buchheim—Schwandorf reichende Karstbereich ein. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Gebieten bildet nicht die Donau oder einer ihrer Zubringer den Vorfluter für die unterirdische Entwässerung, sondern die über den Bodensee zum Rhein fließende Radolfzeller Aach im Hegau. Dieser Teil der Schwäbischen Alb wird im Abschnitt 5. 4. 4. gesondert besprochen.

Der Karstkörper östlich von Buchheim liegt bereits wieder außerhalb des Einzugsgebietes des rheinischen Gewässernetzes. Die Abdichtung nach Süden durch die Molasse ist noch weitgehend intakt, so daß an der Überlagerungsgrenze bei Heudorf, Krumbach und Boll Überlaufquellen auftreten. Sie entwässern über die Ablach zur Donau.

Nach Norden dürfte der Karstwasserkörper eine leichte Aufwölbung besitzen, deren Scheitelzone etwa von Buchheim nach Nordosten verläuft. Im Anschluß daran sinkt der Karstwasserspiegel bis zur Donau ab. Diese ist dort, wie es zwei große Karstquellen (Roter Brunnen und Reinbrunnen) unmittelbar am rechten Ufer verdeutlichen, wieder voll als Vorfluter wirksam.

5. 4. 4. Das Donau-Aach-System

Der Abschnitt der Schwäbischen Alb südlich der Donau zwischen dem Neuhöwen und der Linie Buchheim—Schwandorf im Osten stellt einen hydrologisch einheitlichen, zusammenhängenden Karstkörper dar. Sein unterirdisches Entwässerungssystem — das Donau-Aach-System — ist ausschließlich nach Süden zum tieferen, rheinischen Vorfluter ausgerichtet. Der Hauptaustritt des Karstwassers erfolgt über die Aachquelle im Hegau, deren Schüttung wesentlich von der Versickerung des Donauwassers im Norden beeinflusst wird.

Die großen Wasserverluste an der Donau einerseits sowie die starke Schüttung der Aachquelle andererseits erregten schon in früheren Jahrhunderten die Aufmerksamkeit der Menschen (F. W. BREUNINGER, 1719). Seit nunmehr fast hundert Jahren steht dieses unterirdische Entwässerungssystem immer wieder im Mittelpunkt karsthydrologischer Forschungen. Sie haben ihren Niederschlag in einem umfangreichen Schrifttum gefunden, das von W. KÄSS (1969) in bibliographischer Form zusammengefaßt wurde. Eingehende Untersuchungen erfolgten zuletzt in den Jahren 1966—1969 in Zusammenarbeit verschiedener Institutionen im Rahmen der 2. Internationalen Fachtagung zur Untersuchung unterirdischer Wasserwege mittels künstlicher und natürlicher Markierungsmittel in Freiburg i. Br. Über die Ergebnisse berichteten H. BATSCHÉ et al. (1970), H. BATSCHÉ, H. MOSER & W. STICHER (1972), H. HÖTZL (1971), H. HÖTZL & W. HUBER (1972) und W. KÄSS (1972). Fortgesetzt wurden diese Untersuchungen 1971 mit weiteren Färbversuchen, deren Ergebnisse von H. HÖTZL & W. KÄSS (1973) veröffentlicht wurden. Da im nachfolgenden nur zusammenfassend auf diese Untersuchungen eingegangen werden kann, seien die an Detailfragen interessierten Leser auf die genannte Literatur verwiesen.

Dieses unterirdische Entwässerungssystem ist heute wohl eines der eindruckvollsten Beispiele für das weitere Vordringen des rheinischen Gewässernetzes infolge seiner tiefen Erosionsbasis am Oberrhein (vgl. Abschnitt 3.2.). Die Umstellung von der danubischen zur rheinischen Richtung dieses Karstgebietes setzte im Mittelpleistozän (Mindel-Riß-Interglazial) mit der Ausräumung des Hegaubeckens und der damit verbundenen Zerschneidung und Abtragung der dort über den Jurakalken liegenden, abdichtenden tertiären Sedimenthülle ein. Infolge der gegenüber dem Donautal um 180 m tieferen Lage des Vorflutsystems im Hegau verschob sich die Karstwasserscheide durch rück-schreitende unterirdische Erosion immer wieder weiter nach Norden. Über den Zeitpunkt, wann diese auch Teile des Donautales erfaßte und damit die Versickerung ermöglichte, liegen keine genauen Anhaltspunkte vor. Die Zunahme der jährlichen Vollversickerungstage in den letzten hundert Jahren spricht für eine junge nacheiszeitliche Einbeziehung des Donautales in den nach Süden entwässernden Karstkörper. Dagegen ist die Anlage des Aachtopfes würmeiszeitlich. Vieles deutet aber darauf hin, daß im Aachtopf durch die Schmelzwasser-rinne nur ein älteres, ursprünglich weiter nach dem Süden entwässerndes Karstsystem angeschnitten wurde (H. HÖTZL & W. HUBER, 1972).

Die Versickerung von Donauwasser erfolgt im Bereich der verkarsteten Oxford- bzw. Kimmeridgekalke auf dem 40 km langen Flußabschnitt zwischen Immendingen und Fridingen. Die bedeutendsten Versickerungsstellen liegen im Bereich des Immendinger Wehres, in der Flußschleife des Brühl zwischen Immendingen und Möhringen sowie in der Flußschleife unterhalb von Fridingen. Die Gesamtverluste betragen im langjährigen Mittel rund $7,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (H. HÖTZL, 1971); davon entfallen fast $6 \text{ m}^3/\text{s}$ auf die nur 5 km lange Flußstrecke zwischen Immendingen und Möhringen, die daher in ihrem unteren Teil bei geringer Wasserführung der Donau vollkommen trocken liegt. Kompliziert sind die Verhältnisse im Bereich der Fridinger Schleife (Fig. 20).

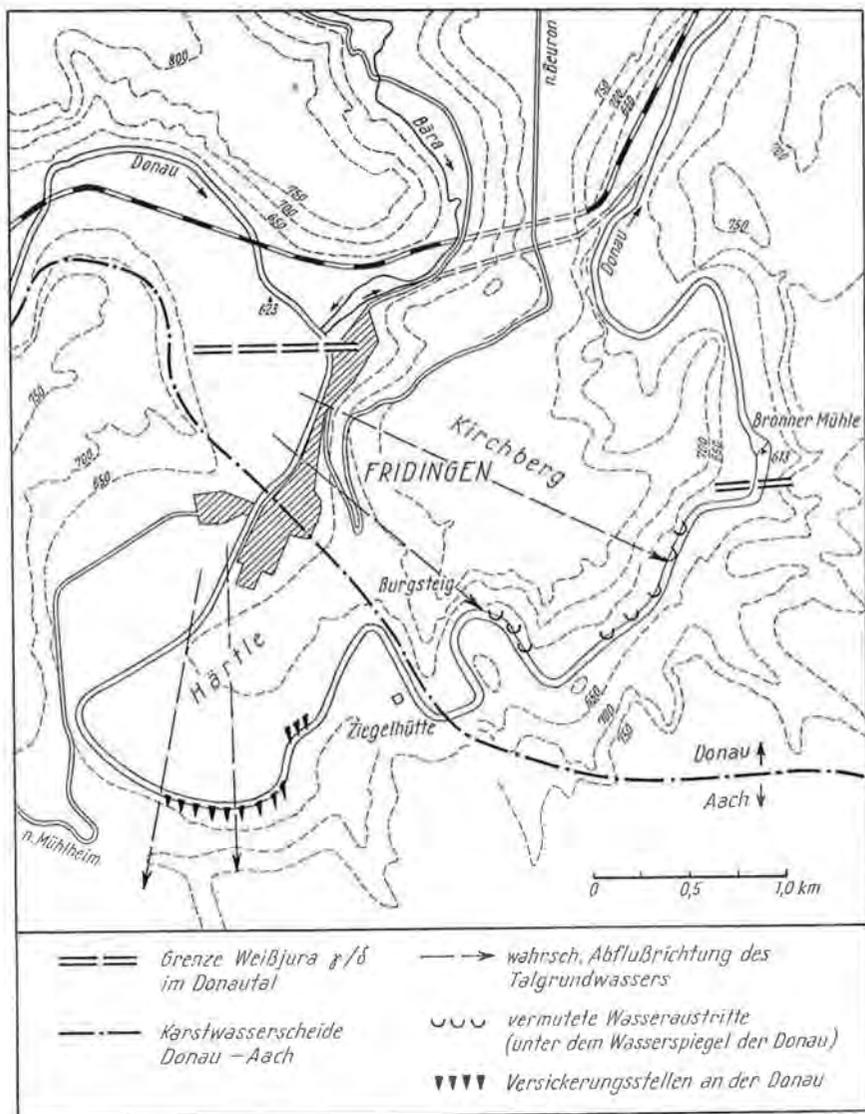


Fig. 20: Karsthydrologische Übersichtsskizze der Fridinger Donauschleife. Eingezeichnet sind nur die Versickerungsstellen im Bereich der Kimmeridgекalke (Weißjura δ). Es ist jedoch, zumindest zeitweise, unmittelbar südlich der eingezeichneten Ausstrichsgrenze der Kimmeridgemergel etwa im Ortsbereich von Fridingen ein verstärkter Übertritt von Donauwasser in das Talgrundwasser und von dort in den Karstwasserkörper anzunehmen.

Noch im Ortsteil von Fridingen versickert ein Teil des Donauwassers zunächst in die kiesige Talfüllung, um von dort über die Kimmeridgalkalke teils der Aach im Hegau, teils aber nur die Schleife abkürzend wieder der Donau im Stauraum der Bronner Mühle zuzufießen.

Der Wiederaustritt des versickerten Donauwassers in der Aachquelle konnte zum erstenmal von A. KNOF (1878) nachgewiesen werden. Trotz später wiederholt durchgeführter Markierungsversuche blieb die Frage offen, ob tatsächlich das gesamte an der Donau versickernde Wasser ausschließlich in der Aachquelle zutage tritt, wie es zunächst auf Grund der durchgeführten Versuche den Anschein hatte. Abzuklären blieb auch die genaue Abgrenzung des Einzugsgebietes der Aachquelle. Der Beantwortung dieser offenen Fragen dienten die in den Jahren 1966—1969 im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit verschiedener Institutionen durchgeführten Forschungen. Im Vordergrund standen hydrogeologische, hydrochemische und isotopehydrologische Untersuchungen, die durch einen kombinierten Markierungsversuch abgeschlossen wurden. Über die Ergebnisse (Tabelle 7 und Tafel I) berichteten H. BATSCHKE et al. (1970).

Durch den kombinierten Markierungsversuch konnte die Frage nach dem Einzugsgebiet der Aachquelle südlich der Donau weitgehend abgeklärt werden. Die Eingabestellen B im Westen und F im Osten (Tafel I) waren bereits in den auf Grund der hydrogeologischen Voruntersuchungen zu erwartenden Grenzbereich gelegt worden. Die Ergebnisse bestätigten diese Annahme. Das bei B in einer Doline nordwestlich des Hegaublickes eingebrachte Sulforhodamin G extra konnte in der Aachquelle mit einer schönen Durchgangskurve nachgewiesen werden. Da nur wenige Kilometer westlich von der Doline aus den gleichen Schichten Karstquellen austreten, muß die Karstwasserscheide unmittelbar westlich von der Eingabestelle B angenommen werden. Das bei F im Osten eingebrachte Uranin trat hingegen nur in geringen Spuren nach einer langen Laufzeit in der Aachquelle zutage. Aus der benötigten langen Zeit zum Wiederaustritt sowie der geringen Ausbringung können wir unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Ergebnisse schließen, daß die Farbeingabe in unmittelbarer Nähe des Scheitelpunktes der Karstwasseroberfläche erfolgte.

Auch die zweite Hauptfrage nach dem möglichen Wiederaustritt des versickerten Donauwassers in weiteren Quellen neben der Aachquelle konnte durch den Versuch eindeutig beantwortet werden. Durch den Nachweis der in einer Schwinde am Brühl eingebrachten Sporen und Keime im Aachtopf und in weiteren Karstquellen bei Engen und Eigeltingen sowie in mehreren Brunnen südlich von Engen und Aach, die das Wasser aus quartären Kiesen fördern, geht eindeutig hervor, daß der im wesentlichen durch die Donauversickerung gespeiste Karstwasserkörper durch die Täler des nördlichen Hegaus zwischen Engen und Eigeltingen angezapft wird. Die Entwässerung

Tabelle 7: Übersicht über die verwendeten Markierungsmittel und die Ergebnisse des komb. Versuches am 26. August 1969 im Bereich zwischen der Donauversickerung und der Aachquelle (nach H. BATSCHKE et al., 1970).

Ein-gabe-stelle	Entfern.-z. Aachqu. in km	Höhenunter-schied/Gefälle z. Aachqu. in %	Markierungsmittel	Auftreten in der Aachquelle n. Std. u. Abstands-geschwindigkeit in m/Std.		Höchste Konzentration	Nebenausr. (s. Tafel I)
				1. Auftreten/Maximum			
A	13,3	179/13,5	1000 kg KCl	34 364	54 208	0,44 mg K/l	
			150 l Dipenten	31 422	36 360	rd. 0,13 mg/l	
B	11,4	290/25,4	8 kg Sulforhodamin G extra	111 103	129 88	2,1 mg/m ³	
C	6,45	63/9,7	250 kg Ammonbromid	—	—	—	
D	18,3	142/7,8	4 Curie ⁵¹ Cr komplexgeb.	55 332	79 232	6.10 ⁻⁹ Ci/l	
			20 kg Lanthannitrat = 6,2 kg La, komplexg.	38 968 (?)	50 350	2,4 mg La/m ³	12
E	11,8	245/20,5	200 kg harte Deterg. + 200 kg weiche Deterg.	63 190	70 170	235 mg/m ³	11, 12, 13
			75 kg Isobornylazetat	ca. 90 —	ca. 110 —	?	
F	19,8	310/15,6	50 kg Utanin	rd. 24	rd. 8	rd. 0,005 mg/m ³	
G	11,7	178/15,6	Serratia marcescens 3.10 ¹⁸ Keime	39 304	47 252	4 Keime je 0,5 ml	12, 15, 16, 18, 24, 60
			45 kg braungefärbte Lycopodiumsporen	27 450	46 255	425 Sporen/6-Std.-Probe	10, 24, 25, 56
H	14,2	190/13,4	50 t Streusalz	64 222	71 212	0,70 mval/l	
I	15,4	260/16,9	28 kg grüingefärbte Lycopodiumsporen	69 226	84 184	63 Sporen/6-Std.-Probe	

erfolgt zwar zur Hauptsache über die Aachquelle, doch tritt ein nicht unbedeutender Teil des Karstwassers und damit auch des versickerten Donauwassers direkt in den Grundwasserkörper der quartären Tal-füllung über.

Das Einzugsgebiet des unterirdischen Donau-Aach-Systems, das durch die genannten Markierungsversuche hinlänglich genau abgegrenzt werden kann, umfaßt 252 km². Sein Wasserdargebot beträgt nach einer vereinfachten Übersichtsberechnung (H. HÖTZL & W. HUBER, 1972) im Mittel rund 10 m³/s, davon entfallen 8,5 m³/s auf die Aachquelle, die damit die größte Quelle Deutschlands ist (max. Schüttung 24,1 m³/s). Das Karstwasserdargebot ergibt sich aus dem Versickerungsanteil des Niederschlages im eigenen Einzugsgebiet, aus Zuflüssen eines 405 km² großen Niederschlagsgebietes im Norden der Donau und der Versickerung von Donauwasser aus ihrem Einzugsgebiet oberhalb von Immendingen. In der Berechnung wurde allerdings für den zuletzt genannten Punkt nur der Abfluß in der Donau herangezogen. Zu berücksichtigen wäre noch der Grundwasserstrom des Donautales oberhalb von Immendingen, der ja auch weitgehend dem Donau-Aach-System zufließt. Das Wasserdargebot im Karstkörper erhöht sich dadurch noch und liegt damit beträchtlich über dem mittleren Abfluß der Aachquelle. Da nur ein kleiner Teil des verbleibenden Wassers in den Quellen bei Engen und Eigeltingen zutage tritt, muß die direkt in die quartäre Tal- und Beckenfüllung des Hegaus abfließende Karst-wassermenge entsprechend groß sein.

Wichtige Aufschlüsse über das komplexe hydraulische Verhalten dieses Karstkörpers geben der Vergleich der Abflußkurven von Donau und Aach sowie die Ergebnisse der verschiedenen Markierungsversuche. Sie lassen ein bevorzugtes System von unterirdischen Wasserwegen erkennen, die mit dem übrigen Karstwasserkörper in einer ähnlichen Wechselbeziehung stehen wie ein oberirdisches Gerinne zu seinem zugehörigen Grundwasserkörper (H. HÖTZL, 1971, H. HÖTZL & W. HUBER, 1972). Ergänzende Hinweise über Verweilzeiten, Abflußverhalten und Wasserhaushalt erbrachten die Isotopenuntersuchungen (H. BATSCHKE et al. 1970). Hingewiesen sei neben der Untersuchung der jahreszeitlichen Tritium- und Deuteriumschwankungen vor allem auf die Radiokarbon-Bestimmungen. Die daraus errechneten Verweilzeiten der aus dem Donau-Aach-System im Süden auslaufenden Wässer liegen mit 10 bis 14 Jahren deutlich unter denen aus Karstkörpern vergleichbarer Größe. So beträgt die mittlere Verweilzeit sowohl für die Karst-wässer aus dem östlich von Buchheim anschließenden Gebiet als auch für jene aus dem Karstbereich nördlich der Donau rund 20 Jahre. Die Ursache dieser Differenz von 6 Jahren wird man ohne Zweifel in den besonderen hydraulischen Verhältnissen im Donau-Aach-System, bedingt durch das steile Gefälle und den großen „Fremdwasser“-Durchlauf sehen können.

5. 5. Das Tertiär am Südrand der Alb

Die tertiären Schichten im Hangenden der Malmfolge bestehen im Bereich der Hegualb und des Randen vorwiegend aus der als Juranagelfluh bezeichneten Randfazies der Oberen Süßwassermolasse. Die starke Verbreitung von tonig-kalkigem Schluff, der weithin auch das Bindemittel der einzelnen Konglomeratlagen bildet, bewirkt, daß die Einsickerung und Speicherung von Grundwasser recht gering ist. Meist ist daher die Wasserführung dieser Schichten auf die oberflächennahen, aufgelockerten Bereiche der einzelnen Geröllagen beschränkt. Ein ausgeprägter Quellhorizont tritt über der Basis des Tertiär, den Bohnerzlehmen, auf.

Die Queldichte ist im Juranagelfluhgebiet relativ groß, doch liegt die Schüttung der einzelnen Wasseraustritte meist unter 1 l/s; häufig beträgt sie nur wenige Zehntelliter. Infolge der oberflächennahen Wasserführung im Gestein sind die Quellen hygienisch anfällig und die Schüttungsschwankungen in starkem Maße vom jeweiligen Niederschlag abhängig.

Genutzt werden vor allem die Wasseraustritte im Bereich der Nebentäler südlich der Aitrach. So bestehen Fassungen im Kummried und Kohlwald für Fützen und Randen, im Weihergraben für Leipferdingen und im Vieltel für Aulfingen. Aber auch im Hegau wird das aus der Juranagelfluh austretende Wasser, wie zum Beispiel im Jägerthal westlich von Engen, zur Trinkwasserversorgung verwendet. Bei Watterdingen steht in diesen Schichten eine 70 m tiefe Brunnenbohrung, aus der 0,1 l/s artesisch überlaufen. Für dieses Wasser ergab die Radiokarbonbestimmung eine mittlere Verweilzeit von 15.000 Jahren (H. BATSCHKE et al., 1970).

Für die Siedlungen auf der Albhochfläche südlich der Donau waren früher die aus den Resten der tertiären Auflagerung kommenden kleinen Quellen die einzigen Wasserlieferanten. Vielfach waren sie ausschlaggebend für die Anlage der einzelnen Ortschaften, wie z. B. für Hattingen, Emmingen ob Egg, Liptingen und Worndorf. Heute beziehen diese Gemeinden das Wasser von Brunnen im Aitrachtal sowie von Quellen (Langenbrunn) im Donautal.

5. 6. Das Grundwasser in den quartären Ablagerungen

5. 6. 1. Der Bereich des Donautales

Die Bedeutung des Grundwassers der quartären Talfüllung des Donautales ist infolge der schwankenden Mächtigkeiten der Kiese sehr unterschiedlich. Im Bereich der beiden Quellflüsse Breg und Brigach herrschen im allgemeinen mehr oder weniger grobe Schotter vor. In

den häufig wechselnden engen und weiten Talabschnitten besteht ein enger Zusammenhang zwischen dem Fluß- und Grundwasser. Grundwasserentnahmen sind bei den zahlreich vorhandenen Quellen dieses Gebietes selten.

Größere Mächtigkeiten erreicht die Kiesfüllung im Bereich des Donaueschinger Riedes. Bedingt durch die Salzauslaugung im Muschelkalk des Untergrundes sowie durch die Kippung der Sedimentfolge im Zuge der jüngsten Heraushebung hat sich dort ein Schotterfang ausgebildet (G. WAGNER, 1929 und W. PAUL, 1950). Die Basis der quartären Aufschüttung liegt in einer Tiefe von 5 bis 7 m und wird von den gipsführenden Mergeln des Keupers gebildet. Nur in einer aus dem Bregtal von Bränlingen kommenden und am Westrand des Riedes von Hüfingen nach Donaueschingen verlaufenden Rinne betragen die Kiesmächtigkeiten bis zu 15 m.

Das Grundwasser dieses Raumes wird in starkem Maße von dem aus dem Muschelkalk hochstoßenden Karstwasser beeinflusst (vgl. Abschnitt 5. 2. 2.). Der ausgedehnte Grundwasserkörper des eigentlichen Riedes, dessen Wasserspiegel nur wenig unter der Oberfläche liegt, ist jedoch für die Trinkwassergewinnung infolge der großen Sulfathärte sowie auch hoher Eisengehalte der Wässer nur wenig geeignet.

Im anschließenden Teil des Donautales zwischen Gutmadingen und Immendingen liegen die Kiesmächtigkeiten unter 5 m. Die Ergiebigkeiten einzelner Brunnen in der Talaue bei Neudingen und Gutmadingen betragen zwischen 3 und 5 l/s bei Absenkungen von 3 m und mehr. Versuchsbohrungen in der Donauaue bei Geisingen förderten bei einer kiesig-tonigen Talfüllung von 3 bis 4 m Mächtigkeit nur 0,7 bis 2 l/s. Etwas günstiger sind die Erschließungsmöglichkeiten im Bereich der seitlichen, aus den Nebentälern kommenden Schuttfächer. So konnten anlässlich eines Pumpversuches bei Geisingen aus dem dem Wildtal vorgelagerten Schuttkegel bis zu 18 l/s gefördert werden.

Von Immendingen bis Möhringen ist auch das Talgrundwasser von den Wasserverlusten im Bereich der verkarsteten Kalke betroffen. In einem am Nordrand der Brühlschleife gelegenen Brunnen liegt der Wasserspiegel zeitweise bis zu 12 m unter dem nur wenig entfernten Donaubett. Ein größerer unterirdischer Abfluß wurde im Raum Tuttlingen festgestellt (K. C. BERZ, 1928). Dort fließt das Grundwasser zum Teil entgegen der Fließrichtung der Donau den unterirdischen Schwinden zu.

Günstiger sind die Verhältnisse bei Ludwigstal östlich von Tuttlingen, wo die undurchlässigen Oxfordmergel den Kieskörper unterlagern. Infolge des Zuflusses von Karstwässern aus dem Norden entstehen zum Teil ergiebige Grundwasservorkommen. Die Stadt Tuttlingen hat dort zwei 7 m tiefe Horizontalfilterbrunnen stehen, die bei Entnahmen von 35 l/s bzw. 138 l/s eine Absenkung von nur 0,7 m hervorrufen.

Für den Abschnitt von Ludwigstal bis Mühlheim können wir zumindest für die nördliche Talhälfte analoge Bedingungen annehmen, während sich in der südlichen Hälfte vor allem im Bereich der Talflanke wieder der Abfluß in das unterirdische Donau-Aach-System bemerkbar macht. Unterhalb von Beuron sind im Donautal wieder ergiebige Grundwasservorkommen vorhanden. Sie sind aber kaum für die Wassergewinnung erschlossen, da dort hauptsächlich die großen Karstquellen genutzt werden.

Bedeutende Grundwassermengen finden sich auch in den beiden auf die Feldberg- und die Eschach-Donau zurückgehenden Taltorsos, die heute von der Aitrach bzw. dem Faulenbach (siehe Abschnitt 3. 2.) durchflossen werden. Im Aitrachtal beträgt die quartäre Talfüllung 9 bis 14 m (K. BRAUN, L. ERB & K. SAUER, 1953). Sie besteht im oberen Teil aus Lehmen und Kalkschottern sowie im Liegenden aus eiszeitlichen Schwarzwaldkiesen. Das Grundwasser ist auf weite Strecken gespannt und kommt im wesentlichen über die Jurakalke aus dem Niederschlagsgebiet der Länge. Nach vorsichtigen Schätzungen der genannten Autoren besteht eine Entnahmemöglichkeit von 300 l/s für das gesamte Aitrachtal. Diese Wassermenge wird heute bereits etwa zur Hälfte über den Aitrach-Wasserversorgungsverband Hondingen, dem Wasserwerk der Stadt Blumberg sowie über die Wasserversorgungsgruppen Unteres Aitrachtal und Oberes Aitrachtal genutzt.

Im Bereich des Faulenbaches erreicht die quartäre Talfüllung eine Mächtigkeit bis zu 40 m (G. WAGNER, 1961). Sie besteht im wesentlichen aus Weißjuraschutt, nur im tieferen Teil kommen wieder Schwarzwaldkiese vor, die auch hier besonders wasserreich sind. Erschlossen wird das Grundwasser des Faulenbachtals für die Wasserversorgung der Ortschaften Spaichingen, Balgheim, Dürrheim und Würmlingen.

5. 6. 2. Die Hegausenke

Das nachrißeiszeitliche Talsystem des Hegaus wurde während der letzten Eiszeit mit bis über 50 m mächtigen, sandig bis kiesigen Schmelzwassersedimenten und Moränenmaterial aufgefüllt. Für die hydrogeologischen Verhältnisse sehr wesentlich ist die Gliederung der Schmelzwasserschotter durch Geschiebemergel in eine untere und obere Serie. Wenn auch diese Abfolge nicht immer so einfach ist, sondern häufig gerade durch Verzahnung und Wechsellagerung an den Grenzbereichen oder durch die Einschaltung von Stauseesedimenten einen komplizierten Schichtaufbau bedingt, so können wir doch im allgemeinen zwei voneinander getrennte Grundwasserstockwerke unterscheiden.

Die liegenden Kiese wurden durch die Schmelzwässer des vorrückenden Gletschers in den tief eingeschnittenen Rinnen angehäuft. Ihre Verbreitung hat A. SCHREINER (1968) auf Grund zahlreicher Bohrungen sowie geoelektrischer und seismischer Messungen dargestellt.

Dieses untere, gespannte Grundwasserstockwerk ist heute vor allem im Raume von Singen für die Wasserversorgung erschlossen. Hervorzuheben sind die beiden von dem Markierungsversuch 1969 betroffenen Bohrungen. Die erst im Frühjahr 1969 abgeteufte Bohrung bei der Bleiche östlich von Welschingen erbringt im freien Überlauf 30 bis 60 l/s. Der Tiefbrunnen Beuren (24 m tief, 8 l/s) liefert dagegen Wasser mit einer erhöhten Temperatur von 13,7° C. A. SCHREINER (1966) vermutete daher einen Zusammenhang mit einem Karstwasseraufbruch aus 120 m Tiefe.

Das obere Grundwasserstockwerk wird von den Terrassenschottern gebildet. Der Grundwasserspiegel liegt zum Teil nur geringfügig unter dem Gelände und kommuniziert mit den offenen Gerinnen. Südlich von Engen, etwa zwischen Welschingen und Ehingen, treten an den Terrassenrändern mehrere Quellen auf. Für die Wasserversorgung der Stadt Singen ist die Bitzenquelle nordöstlich von Ehingen gefaßt. Die größte von den genannten Quellen ist jedoch die Bleiche östlich von Welschingen mit einer durchschnittlichen Schüttung von 35 bis 40 l/s. Sie dringt als Waller aus den Kiesen hoch und ist heute zu einem Quellteich aufgestaut. Die Übereinstimmung ihres Chemismus sowie des Abflußverhaltens mit der vorher erwähnten Bohrung lassen ein Aufstoßen des Wassers aus dem unteren Grundwasserstockwerk vermuten.

Für die Beantwortung der Frage nach der Erneuerung und dem Wasserdargebot in diesen quartären Kiesen war der 1969 durchgeführte Markierungsversuch (H. BATSCHE et al., 1970) von entscheidender Bedeutung. Er zeigte, daß sowohl dem unteren als auch oberen Grundwasserstockwerk im Raum südlich von Engen und Aach Karstwasser aus den Jurakalken zugeführt wird. Für die Grundwässer der östlich davon gelegenen Talfüllung von Eigeltingen—Orsingen ist auf Grund der analogen hydrologischen Verhältnisse ebenfalls eine Erneuerung durch das Karstwasser in Betracht zu ziehen.

6. Hydrochemie

6. 1. Probenahme und chemische Untersuchungen

Die Beprobung der verschiedenen Quell- und Brunnenwässer des Arbeitsgebietes zur Untersuchung ihrer chemischen Beschaffenheit erfolgte parallel zur hydrogeologischen Aufnahme in den Jahren 1966 und 1970. Um trotz der zeitlich auseinanderliegenden Entnahmen eine möglichst große Vergleichbarkeit der Untersuchungen zu erreichen, wurden in den einzelnen Jahren die Proben nur jeweils in der

Zeit von August bis November, während der sommerlich-herbstlichen Niedrigwasserperiode gezogen.

In die Untersuchung einbezogen waren über 1400 verschiedene Quell- und Brunnenwässer. Bei dem großen Arbeitsgebiet war es nicht möglich, die chemischen Kennwerte aller Wasseraustritte zu bestimmen. Eine Ausnahme bildete der weitere Donau-Aach-Raum, wo fast alle Quell- und Brunnenwässer beprobt und untersucht wurden. Im übrigen wurde eine gleichmäßige Verteilung der Entnahmestellen unter Berücksichtigung der verschiedenen Quelltypen angestrebt. Die Beprobung erfolgte in der Regel einmalig, wurde aber teilweise zu Vergleichszwecken nach einem Jahr wiederholt. Die jahreszeitlichen Veränderungen des Wasserchemismus konnten nur im Donau-Aach-Raum näher untersucht werden. Die Ergebnisse wurden bereits in H. BATSCHKE et al. (1970) und H. HÖTZL & W. HUBER (1972) veröffentlicht.

Bereits im Gelände, unmittelbar nach der Entnahme, erfolgte die Bestimmung des pH-Wertes, der Leitfähigkeit und der Temperatur. Auf die Ermittlung der freien Kohlensäure sowie des freien Sauerstoffes mußte aus technischen und zeitlichen Gründen verzichtet werden. Vergleichswerte standen aus den Unterlagen des Wasserwirtschaftsamtes Donaueschingen zur Verfügung. Die Laboranalyse umfaßt die Untersuchung der Kationen Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , $\text{Fe}^{++} + \text{Fe}^{+++}$ und Mn^{++} , der Anionen Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- , SO_4^{--} und PO_4^{--} sowie des molekularen SiO_2 . Insgesamt wurden zusammen mit den monatlichen Entnahmen über 2200 Proben im Labor des Geologischen Instituts der Universität Karlsruhe untersucht. Das umfangreiche Datenmaterial, das hier aus Platzgründen nicht veröffentlicht werden kann, ist auf Lochkarten und Magnetband im oben genannten Institut hinterlegt. Die Ausführung der einzelnen Analysen erfolgte im wesentlichen nach den in den „Deutschen Einheitsverfahren zur Wasseruntersuchung“ (= DEV) beschriebenen Methoden. Für die meist photometrischen Bestimmungen wurde ein ZEISS-Spektralphotometer PM Q II mit Flammenzusatz verwendet.

6. 2. Chemische Beschaffenheit der Grundwässer

6. 2. 1. Die Grundwässer des Grundgebirges

Die weichen, aus den Gneisen, Graniten und Granitporphyren kommenden Wässer enthalten im Mittel 250 μval gelöste ionisierte Stoffe (Tabelle 8). Trotz geringer Mineralisierung zeichnet sich bereits eine sehr gleichbleibende Vormacht der Calcium- und Hydrogenkarbonationen ab, die jeweils etwas über 50 $\text{mval}\text{-}\%$ erreichen. Bei den Kationen folgt das Magnesium und das Natrium mit rund 20 $\text{mval}\text{-}\%$, während bei den Anionen auf das Chlorid und das Sulfat die nächsthöchsten Anteile entfallen (Fig. 21). Das Na/Cl-Verhältnis

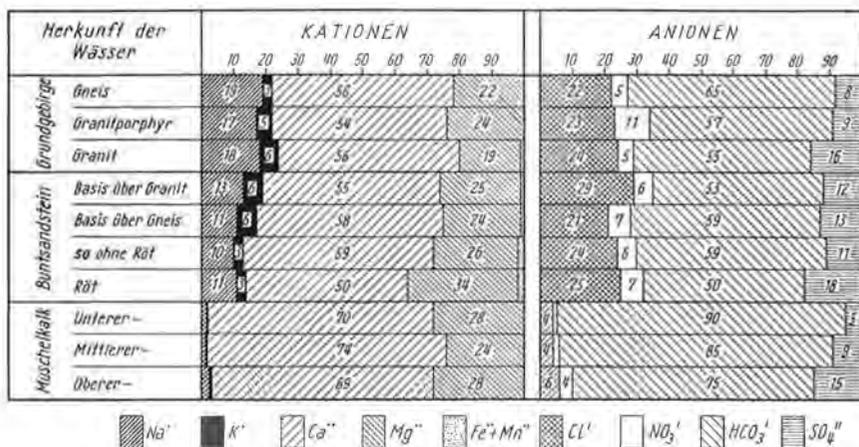


Fig. 21: Durchschnittliche Ionenverteilung in mval-% der Grundwässer des Grundgebirges, des Buntsandsteines und des Muschelkalkes.

ist sehr ausgeglichen und erreicht mit 0,8 bei den Graniten und mit 0,9 bei den Gneisen die höchsten Werte im Untersuchungsgebiet. Hervorzuheben sind die im Vergleich zur Mineralisierung recht hohen Gehalte der Kieselsäure mit 7—9 mg/l.

Die Wässer reagieren deutlich sauer; der pH-Wert schwankt im allgemeinen zwischen 5,8 und 6,4. Die Sauerstoffsättigung beträgt ca. 95% bei 9 bis 11 mg/l freiem, gelöstem Sauerstoff. Die Kohlensäure ist durchwegs im Überschuß vorhanden, die zugehörigen Werte betragen 10 bis 20 mg/l.

Obwohl sich die Wässer aus den Graniten und Gneisen weitgehend gleichen und demselben Typ angehören, treten infolge der unterschiedlichen chemischen Gesteinszusammensetzung doch einzelne signifikante Abweichungen auf. In erster Linie macht sich dies im Kaliumgehalt bemerkbar, der im Granit und Granitporphyr mit 5,4 mval-% im allgemeinen doppelt so hoch ist wie im Gneis (2,5 mval-%). Bei gleichen Natriumwerten wirkt sich dies deutlich im K/Na-Verhältnis aus, das bei den Gneiswässern 0,17 und bei den Granitwässern 0,36 beträgt. Der Sulfatgehalt liegt in den Granitwässern bei 75 μ val/l und in den Gneiswässern bei 42 μ val/l. Die aus den Granitporphyren kommenden Wässer nehmen hier mit 56 μ val/l eine Zwischenstellung ein.

6. 2. 2. Die Grundwässer des Buntsandsteines

In der Gesamtmineralisierung weichen die Wässer aus dem Buntsandstein nur wenig von denen des Grundgebirges ab. Sie bilden jedoch keine so einheitliche Gruppe, da entsprechend der unterschiedlichen, petrographischen Zusammensetzung die chemische Beschaf-

4 *Tabelle 8: Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammer) der Meß- und Analysendaten für die Grundwässer des Grundgebirges und der Trias. N = die Anzahl der gemittelten Messungen; die Leitfähigkeit ist in MS bei 16°C, die Kieselsäure in mg/l, alle übrigen Daten sind in µval/l angegeben.*

Herkunft der Wässer	N	pH-W.	Leitf.	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cl	NO ₃	HCO ₃	SO ₄	PO ₄	SiO ₂	GEMI
Granit	34	6,16 (0,36)	65 (157)	87 (32)	28 (29)	293 (116)	108 (92)	3 (6)	0 (1)	128 (96)	34 (53)	280 (116)	74 (29)	2 (3)	8,5 (3,3)	521 (208)
Granitporphyr	9	5,82 (0,22)	55 (10)	103 (17)	36 (37)	325 (52)	150 (54)	0 (0)	0 (0)	140 (45)	68 (37)	365 (90)	56 (29)	1 (3)	6,2 (1,7)	623 (104)
Gneis	187	6,44 (0,52)	39 (24)	98 (125)	13 (14)	290 (147)	111 (84)	0 (1)	0 (1)	113 (131)	29 (30)	337 (188)	42 (30)	1 (2)	7,7 (3,4)	519 (260)
Basiskomplex des Buntsandsteins	84	5,96 (0,68)	37 (23)	64 (60)	24 (12)	271 (186)	117 (83)	2 (6)	0 (1)	141 (134)	28 (29)	267 (236)	52 (37)	4 (14)	6,4 (3,8)	488 (277)
Ob. Buntsdst. o. Röt	39	6,00 (0,87)	54 (56)	67 (118)	17 (17)	400 (550)	202 (353)	5 (10)	0 (1)	133 (132)	36 (43)	473 (847)	55 (43)	7 (23)	5,7 (3,1)	700 (885)
Röt	9	6,28 (0,93)	141 (91)	149 (102)	28 (21)	894 (771)	648 (485)	8 (7)	4 (8)	324 (183)	118 (125)	1.074 (1.070)	208 (162)	5 (6)	4,4 (0,5)	1.731 (1.221)
Unterer Muschelkalk	16	7,42 (0,14)	542 (57)	98 (26)	24 (17)	5.263 (663)	2.114 (509)	1 (3)	0 (1)	279 (139)	81 (69)	6.772 (582)	358 (142)	4 (9)	6,2 (0,6)	7.499 (696)
Mittlerer Muschelkalk	19	7,40 (0,19)	498 (50)	84 (45)	30 (40)	5.105 (481)	1.702 (525)	0 (2)	0 (0)	267 (128)	122 (131)	5.872 (729)	619 (315)	2 (3)	6,5 (0,6)	6.903 (659)
Oberer Muschelkalk	26	7,14 (0,28)	511 (184)	150 (69)	39 (30)	4.761 (1.794)	2.019 (955)	0 (0)	0 (0)	356 (118)	278 (165)	5.080 (1.559)	1.242 (1.812)	2 (3)	8,3 (2,5)	6.965 (2.607)
Lettenkeuper	3	6,93 (0,12)	452 (113)	95 (16)	34 (18)	3.893 (957)	2.536 (774)	2 (3)	1 (1)	267 (155)	168 (62)	5.603 (1.432)	549 (273)	14 (18)	8,2 (0,5)	6.582 (1.728)
Gipskeuper	17	7,40 (0,42)	1.728 (452)	213 (104)	54 (31)	21.239 (4.552)	3.529 (410)	0 (0)	0 (0)	305 (38)	54 (108)	5.804 (726)	18.600 (7.092)	1 (2)	8,9 (1,3)	24.896 (9.580)
Sandsteine des Mittleren Keupers	3	7,72 (0,44)	558 (33)	129 (5)	38 (5)	4.940 (290)	2.590 (355)	2 (3)	1 (1)	183 (30)	104 (52)	6.970 (686)	500 (49)	14 (16)	8,4 (0,6)	7.736 (647)

fenheit der Wässer stärker differiert. Die weichsten Wässer treten unmittelbar an der Basis der Triasfolge über der Auflagerungsfläche auf. Mit einer mittleren Mineralisierung von $490 \mu\text{val/l}$ liegen sie noch unter denen des Grundgebirges. Die Ionenverteilung bleibt allerdings im wesentlichen dieselbe, nur bei den Kationen nimmt das Magnesium auf Kosten des Natriums zu. Der Kalium-, Eisen- und Sulfatgehalt entspricht weitgehend den aus den Graniten kommenden Wässern.

Gegenüber dem konglomeratischen Basiskomplex weisen die aus den Plattensandsteinen austretenden Wässer im Mittel eine fast doppelt so hohe Mineralisierung ($700 \mu\text{val/l}$) auf, ohne daß sich die Ionenverteilung (Fig. 21) wesentlich verändert. Von den bisher genannten Buntsandsteinwässern weichen die meist kleinen Quellen im Bereich der Röttone stärker ab. Mit $1730 \mu\text{val/l}$ ist der Gehalt an gelösten Ionen deutlich höher, wobei sich auch die Ionenverteilung ändert.

Die Buntsandsteinwässer reagieren ausgesprochen sauer. Die pH-Werte liegen zwischen 5,9 und 6,0. Kohlensäure ist im Überschuß vorhanden, wobei Werte von 30 bis 60 mg/l auftreten. Die Sauerstoffsättigung ist sehr unterschiedlich; bei den sauerstoffarmen Wässern sind relativ hohe Eisen- und Manganwerte zu beobachten.

Die niedrigere Mineralisierung der Wässer ist nur für den unbedeckten Buntsandstein kennzeichnend. Im Untersuchungsgebiet konnte in der Nähe von Muschelkalkresten eine deutliche Erhöhung der Mineralisierung festgestellt werden, die im wesentlichen auf eine Zunahme der Calcium- und Hydrogenkarbonationen zurückzuführen war. Aufschlüsse im tiefer liegenden und überdeckten Buntsandstein zeigen (K. EISSELE, 1967 und W. KÄSS, 1967), daß der Poren- und Kluftraum von um so höher mineralisierten Wässern erfüllt ist, je tiefer die Wässer erschlossen sind. Auch in der Ionenverteilung macht sich dies durch den Anstieg der Natrium- und Sulfatwerte bemerkbar.

6. 2. 3. Die Grundwässer des Muschelkalkes

Die aus dem Muschelkalk austretenden Quellen führen gewöhnliche Calcium-Hydrogenkarbonatwässer mit einer durchschnittlichen Mineralisierung von $7060 \mu\text{val/l}$. Im einzelnen weisen die Wässer des Unteren Muschelkalkes den höchsten durchschnittlichen Gehalt an gelösten ionisierten Stoffen ($7500 \mu\text{val/l}$) auf, wovon 70 mval-% auf das Calcium und 28 mval-% auf das Magnesium bzw. 90 mval-% auf das Hydrogenkarbonat entfallen. Mit 1,6 mval-% treten die Alkalien kaum in Erscheinung; gleiches gilt für das Chlorid und das Sulfat mit ca. 4 mval-% (Fig. 21).

Demgegenüber erhöht sich der Anteil des Sulfats in den Wässern des Mittleren Muschelkalkes auf 9 mval-%, wodurch das Hydrogenkarbonat auf 85 mval-% zurückgeht. Diese letztgenannten Mittelwerte ergeben sich aus zwei Gruppen von Wässern. Zur einen mit Sulfatwerten von 3 bis 6 mval-% gehören vorwiegend die Quellen

im Bereich westlich der mo-Schichtstufe, wo die Salz- und Gipsgesteine des mm bereits völlig ausgelaugt sind. Die zweite Gruppe mit Sulfatwerten zwischen 10 und 20 mval-% stimmt weitgehend mit den Wässern des Oberen Muschelkalkes überein. Die starken Schwankungen des Sulfatgehaltes in den Wässern des Oberen Muschelkalkes (5 bis 54 mval-%) hängen mit noch nicht vollständig ausgelaugten Gipsresten des Mittleren Muschelkalkes zusammen.

Die Muschelkalkwässer sind im allgemeinen fast neutral (pH-Wert 7,1 bis 7,4); Eisen, Mangan und Phosphat konnten in den meisten Quellen überhaupt nicht nachgewiesen werden. Auffallend sind die deutlich höheren Nitratgehalte (4,3 mval-%) in den mo-Wässern gegenüber denen des mu (1,0 mval-%) und mm (1,7 mval-%). Zu erklären ist dies durch eine stärkere Verunreinigung der mo-Wässer infolge der intensiven Verkarstung.

6. 2. 4. Die Grundwässer des Keupers

Nach der chemischen Zusammensetzung können Wässer aus dem Keuper in zwei große Gruppen geteilt werden. Die einen sind an die gipsführenden Schichten des Mittleren Keupers gebunden, die anderen an den Lettenkeuper sowie an die Ton- und Sandsteinlagen des Mittleren Keupers. In der ersten Gruppe treten Sulfatgehalte bis zu 40.000 $\mu\text{val/l}$ (entsprechend 1,6 g/l) auf, wobei der relative Sulfatanteil zwischen 60 und 80 mval-% liegt (Fig. 22). Neben dem Sulfat fällt auf der Anionenseite das Hydrogenkarbonat ins Gewicht (bis zu 30 mval-%), während dem Chlorid (1 bis 4 mval-%) kaum Bedeutung zu-

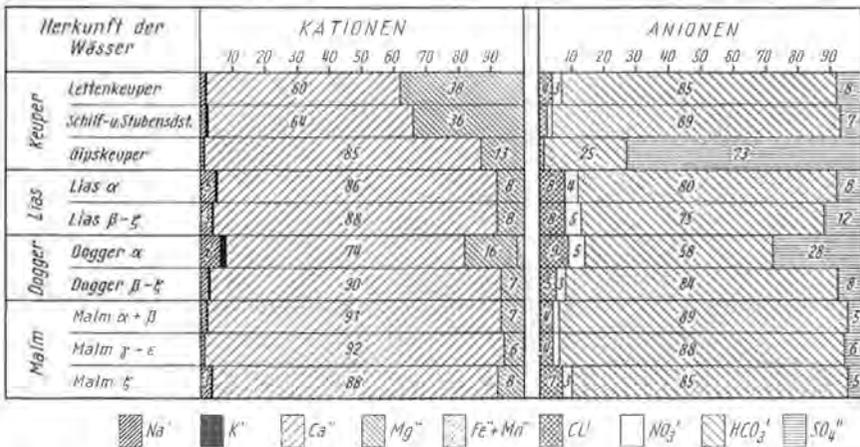


Fig. 22: Durchschnittliche Ionenverteilung in mval-% der Grundwässer der Keuper- und Juraschichten.

kommt. Die Nitratgehalte betragen im Mittel bis zu 234 $\mu\text{val/l}$ (weniger als 1 mval-%), die einzelnen Werte schwanken allerdings erheblich (Tabelle 8).

Bei den Kationen überwiegt das Calcium (80 bis 90 mval-%), gefolgt vom Magnesium (10 bis 15 mval-%). Die Alkalien sind im Durchschnitt mit 2 bis 3 mval-% beteiligt, wobei ein K/Na-Verhältnis von 0,34 ermittelt wurde. Eisen und Mangan treten kaum in Erscheinung.

Die nicht an die gipsführenden Schichten gebundenen Grundwässer des Keupers weichen voneinander durch die unterschiedliche Mineralisierung ab. Die weichsten Wässer mit einem Salzgehalt von 6500 $\mu\text{val/l}$ entstammen dem Lettenkeuper. Danach folgen die Wässer des Schilfsandsteines mit 7400 $\mu\text{val/l}$, die des Stubensandsteines mit 7900 $\mu\text{val/l}$ und die aus den tonig-mergeligen Schichten im oberen Teil des Mittleren Keupers mit 8000 bis 10.000 $\mu\text{val/l}$. Die Ionenverteilung bleibt dabei recht konstant. Bei den Kationen haben Calcium und Magnesium einen Anteil von über 95 mval-%, wobei das Mg/Ca-Verhältnis 0,5 beträgt. Bei den Anionen dominiert in ähnlicher Weise das Hydrogenkarbonat (85 bis 90 mval-%), hinter dem nur noch das Sulfat (bis 8 mval-%) deutlicher hervortritt. Die stärkere landwirtschaftliche Nutzung des von Wiesen und Feldern bedeckten Lettenkeupers gegenüber den bewaldeten Gebieten des Schilf- und Stubensandsteines kommt in dem erhöhten Nitratgehalt (178 gegenüber 55 bis 120 $\mu\text{val/l}$) zum Ausdruck.

6. 2. 5. Die Grundwässer des Lias

Trotz beträchtlicher Schwankungen der Mineralisierung (5000 bis 8000 $\mu\text{val/l}$) bilden die Quellwässer des Lias nach ihrer relativen Zusammensetzung eine einheitliche Gruppe. Es sind ausgesprochene Calcium-Hydrogenkarbonatwässer, die im Mittel 88 mval-% Calcium, 8 mval-% Magnesium und 3,6 mval-% Alkalien bei einem K/Na-Verhältnis von 0,17 enthalten. Auf der Anionenseite sind im Mittel 75 mval-% Hydrogenkarbonat, 12 mval-% Sulfat, 8 mval-% Chlorid, 5 mval-% Nitrat und Spuren von Phosphat vorhanden (vgl. Tabelle 9).

Geringfügige Abweichungen in der Ionenverteilung treten bei den Wässern aus dem Lias α auf. Vor allem ist hier auf den niederen Sulfatgehalt von 514 $\mu\text{val/l}$ gegenüber einem Mittel von 760 $\mu\text{val/l}$ in den übrigen Liaswässern hinzuweisen. Die höchsten Sulfatwerte treten in den Quellen des Lias γ mit 870 $\mu\text{val/l}$ auf. Es kann hier sicherlich ein Zusammenhang mit dem Pyritgehalt der einzelnen Schichten angenommen werden, wobei durch Oxydation des Pyrits zunächst freie Schwefelsäure entsteht, die dann mit dem Calcium aus dem karbonatischen Gestein Gips bildet (G. MATTHES, 1961). Damit stimmt auch der Anstieg des Eisens überein, das in den Wässern des Lias α mit 3 $\mu\text{val/l}$, in denen des Lias γ aber mit 12 $\mu\text{val/l}$ vertreten ist.

Tabelle 9: Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammer) der Meß- und Analysendaten für die Grundwässer des Juras. N = die Anzahl der gemittelten Messungen; die Leitfähigkeit ist in MS bei 16°C, die Kieselsäure in mg/l, alle übrigen Daten sind in µval/l angegeben.

Herkunft der Wässer	N	pH-W.	Leitf.	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cl	NO ₃	HCO ₃	SO ₄	PO ₄	SiO ₂	GEMI
Lias α	17	7,26 (0,36)	511 (62)	364 (609)	24 (26)	5.805 (758)	518 (241)	3 (7)	0 (1)	502 (230)	280 (196)	5.421 (656)	514 (210)	8 (19)	5,6 (0,6)	6.722 (791)
Lias β—ζ	18	7,07 (0,30)	485 (113)	210 (90)	36 (35)	5.491 (1.435)	492 (220)	7 (8)	2 (2)	522 (314)	297 (269)	4.655 (1.282)	759 (485)	22 (19)	5,9 (1,1)	6.248 (1.520)
Dogger α	22	7,07 (0,45)	286 (140)	193 (134)	33 (22)	2.906 (1.642)	558 (368)	37 (39)	5 (6)	304 (218)	147 (239)	2.380 (1.651)	831 (640)	74 (76)	5,2 (1,2)	3.736 (1.747)
Dogger β—ζ	81	7,34 (0,36)	472 (82)	145 (79)	30 (30)	5.677 (950)	425 (365)	2 (8)	0 (1)	299 (249)	162 (206)	5.269 (837)	540 (579)	5 (13)	5,6 (1,1)	6.280 (1.172)
Malm α	39	7,35 (0,28)	400 (60)	120 (173)	20 (21)	4.819 (835)	340 (179)	0 (2)	0 (0)	229 (290)	100 (107)	4.676 (716)	291 (125)	1 (1)	4,7 (0,6)	5.300 (885)
Malm β	40	7,35 (0,26)	409 (33)	79 (45)	17 (16)	5.019 (431)	355 (140)	4 (10)	0 (0)	199 (108)	112 (99)	4.950 (418)	211 (99)	2 (3)	4,3 (0,7)	5.476 (462)
Malm γ	8	7,29 (0,26)	457 (32)	67 (30)	8 (4)	5.375 (577)	326 (129)	14 (35)	0 (0)	221 (109)	128 (109)	5.346 (609)	355 (155)	3 (3)	5,6 (3,8)	5.923 (418)
Malm δ+ε	19	7,31 (0,23)	438 (68)	70 (28)	10 (6)	5.430 (654)	260 (99)	2 (2)	0 (0)	202 (117)	106 (119)	5.231 (614)	230 (161)	3 (5)	5,7 (2,1)	5.773 (740)
Malm ζ	41	7,45 (0,27)	461 (47)	197 (143)	34 (54)	5.473 (735)	512 (309)	3 (8)	0 (0)	434 (282)	191 (161)	5.298 (662)	268 (107)	3 (4)	6,2 (1,6)	6.209 (667)

Die pH-Werte der Liaswässer pendeln um den Neutralpunkt. Freie, aggressive Kohlensäure kann vorhanden sein. Die Sauerstoffsättigung ist sehr unterschiedlich, wobei sie gerade in den Wässern des Lias α sehr hoch ist, während in den Quellen des Lias γ - ε eher schwach reduzierte Verhältnisse vorherrschen.

6. 2. 6. Die Grundwässer des Doggers

Die Quellen des Doggers haben einen durchschnittlichen Salzgehalt von 6280 $\mu\text{val/l}$. Die ionisierten Hauptbestandteile sind auf der Kationenseite wieder das Calcium (90 mval-%), das Magnesium (7 mval-%) und das Natrium (2 mval-%), auf der Anionenseite das Hydrogenkarbonat (84 mval-%), das Sulfat (8,5 mval-%) und das Chlorid (5 mval-%). Die pH-Werte liegen durchwegs im schwach alkalischen Bereich (7,1 bis 7,4). Überschüssige Kohlensäure ist kaum vorhanden, die Wässer befinden sich weitgehend im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht. Repräsentative Angaben über den Sauerstoffgehalt liegen nicht vor.

Stärkere Abweichungen von den genannten Mittelwerten treten in der fast ausschließlich von Tonen aufgebauten Schichtfolge des untersten Braunjura auf. Die Grundwasserführung beschränkt sich dort auf den oberflächennahen Auflockerungsbereich. Infolge der dadurch bedingten unmittelbaren Abhängigkeit vom jeweiligen Niederschlag weisen die einzelnen Quellwässer große Schwankungen in ihrem Salzgehalt auf, wobei die Durchschnittswerte (3700 $\mu\text{val/l}$) fast um die Hälfte geringer sind als in den Quellen des Mittleren und Oberen Doggers. Im einzelnen geht diese geringe Mineralisierung ausschließlich auf die Verminderung des Calcium- bzw. Hydrogenkarbonatgehaltes zurück. Dagegen nehmen die Alkali- und Magnesiumionen sowie die Chlorid- und Sulfationen zu, so daß es zu einer deutlichen Verschiebung in der Ionenverteilung kommt (Fig. 22). Hinzuweisen ist auf die relativ erhöhten Eisen- (37 $\mu\text{val/l}$), Mangan- (7 $\mu\text{val/l}$) und Phosphatgehalte (74 $\mu\text{val/l}$).

6. 2. 7. Die Grundwässer des Malms

Die schon von der Gesteinszusammensetzung der Kalk- und Mergel- folge zu erwartende Calcium-Hydrogenkarbonatvormacht ist so ausgeprägt, daß die übrigen Ionen eine völlig untergeordnete Rolle spielen. Bei einer mittleren Mineralisierung von rund 6000 $\mu\text{val/l}$ entfallen jeweils 90 mval-% auf das Calcium bzw. auf das Hydrogenkarbonat. Bei den Kationen folgt mit durchschnittlich 6 mval-% das Magnesium sowie mit 2 mval-% das Natrium. Das Mg/Ca-Verhältnis ist mit 0,05 bis 0,1 im Vergleich zu den übrigen Wässern des Arbeitsgebietes am niedrigsten. Bei den Anionen ist noch das Sulfat und das Chlorid mit jeweils 5 mval-% sowie das Nitrat mit 1 bis 2 mval-% vertreten. Die

pH-Werte sind sehr konstant und liegen im schwach alkalischen Bereich.

Beim genauen Vergleich der Wässer zeigen sich Unterschiede, die einen Trend in Abhängigkeit von der Zugehörigkeit zu den zunehmend jüngeren Schichten erkennen lassen (Tabelle 9). Am deutlichsten ist dies bei der Gesamtmineralisierung. Sie beträgt für die Quellen des Malm α (ox 1) 5300 $\mu\text{val/l}$, Malm β (ox 2) 5470 $\mu\text{val/l}$, Malm γ (ki 1) 5900 $\mu\text{val/l}$, Malm $\vartheta + \varepsilon$ (ki 2—3) 5700 $\mu\text{val/l}$ und für die Wässer des Malm ζ (ti 1) 6200 $\mu\text{val/l}$. Diese zunehmende Erhöhung geht weitgehend auf den Calcium- und Hydrogenkarbonatanteil zurück, während sich das K/Na- und Na/Cl-Verhältnis gerade umgekehrt verhalten. Ein andersgearteter, regionaler Trend zeichnet sich im Raum südlich der Donau ab. Dort nimmt die Mineralisierung der Wässer nach dem Süden zu. Mit ihr steigt der Magnesium- und Natriumanteil in der Ionenverteilung.

Für den zuerst genannten Trend in der Schichtabfolge ist die Ursache nur schwer zu ermitteln. Dagegen dürfte der regionale Trend weitgehend von der zunehmenden Verweilzeit des Wassers im Untergrund abhängen. Sie bedingt, wie es bei Tiefenwässern allgemein zu beobachten ist, durch anhaltende Lösungsvorgänge eine Erhöhung der Mineralisierung sowie durch den verstärkten Ionenaustausch eine Verschiebung der relativen Zusammensetzung. Hierbei wird das Calcium zunächst durch Magnesium und mit zunehmender Tiefe durch das Natrium ersetzt.

6. 2. 8. Die Grundwässer des Tertiärs

Im Untersuchungsgebiet sind drei Gruppen zu unterscheiden; die Wässer der Juranagelfluh, die Wässer der zur Beckenfazies der Molasse gehörenden Mergel und Tone und die Wässer der Molasse-Sande. Nach der relativen Zusammensetzung stimmen die Quellen der Juranagelfluh fast vollständig mit den Wässern des Malms überein. Das karbonatische Bindemittel sowie die Kalkkomponenten bedingen auch hier die ausgeprägte Calcium-Hydrogenkarbonatvormacht. Im Mittel sind es bei den Kationen 92 mval-% Calcium, 5 mval-% Magnesium sowie 2 mval-% Natrium, bei den Anionen entfallen 87 mval-% auf das Hydrogenkarbonat, 6 mval-% auf das Chlorid sowie jeweils 3 bis 4 mval-% auf das Nitrat und Sulfat. Der durchschnittliche Salzgehalt beträgt 6656 $\mu\text{val/l}$. Zum Teil fallen besonders extreme Nitratgehalte auf. Sie dürften eine Folge der landwirtschaftlichen Nutzung des Einzugsgebietes sein und unterstreichen damit den oberflächennahen Charakter dieses Grundwasserleiters.

Die Wässer der beiden anderen Gruppen weichen gegenüber dem der Juranagelfluh durch die höheren Alkali-, Magnesium- und Sulfatgehalte ab (Fig. 23 und Tabelle 10). Die pH-Werte aller Tertiärwässer liegen in dem schwach alkalischen Bereich zwischen 7,3 und 7,6.

Tabelle 10: Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammer) der Meß- und Analysendaten für die Grundwässer des Tertiärs und Quartärs. N = die Anzahl der gemittelten Messungen; die Leitfähigkeit ist in MS bei 16°C, die Kieselsäure in mg/l, alle übrigen Daten sind in µval/l angegeben.

Herkunft der Wasser	N	pH-Wert	Leitf.	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cl	NO ₃	HCO ₃	SO ₄	PO ₄	SiO ₂	GEMI
Juranagelfluh	111	7,39 (0,23)	490 (50)	154 (163)	24 (47)	6.144 (495)	326 (239)	7 (20)	1 (6)	386 (240)	234 (180)	5.810 (495)	225 (121)	2 (5)	5,9 (2,0)	6.659 (498)
Mergel + Tone Mol.-Beckenfaz.	11	7,55 (0,24)	529 (66)	298 (107)	66 (145)	5.415 (868)	1.411 (545)	32 (67)	3 (7)	496 (340)	184 (164)	5.968 (546)	491 (236)	3 (3)	8,5 (0,8)	7.185 (839)
Sande der Mol.-Beckenfaz.	5	7,44 (0,12)	556 (104)	420 (228)	31 (15)	4.776 (1.247)	1.922 (116)	0 (0)	0 (0)	681 (230)	242 (187)	5.644 (1.157)	571 (182)	1 (0)	11,2 (0,0)	7.145 (1.510)
Rißmoräne	41	7,50 (0,25)	470 (49)	188 (61)	19 (34)	5.324 (599)	761 (428)	10 (17)	1 (3)	443 (180)	241 (188)	5.331 (623)	295 (156)	6 (15)	8,3 (1,8)	6.311 (624)
Würmmoräne	46	7,52 (0,17)	523 (56)	282 (101)	18 (9)	5.004 (512)	1.693 (391)	9 (15)	2 (8)	506 (322)	244 (210)	5.731 (572)	472 (200)	2 (2)	9,0 (2,0)	6.984 (412)
Terrassenkies (Würm)	32	7,45 (0,26)	545 (61)	308 (104)	51 (31)	5.346 (746)	1.560 (642)	14 (24)	1 (4)	631 (297)	345 (191)	5.783 (699)	485 (136)	2 (2)	9,8 (3,0)	7.265 (670)
Rinnenschotter	5	7,22 (0,32)	500 (39)	314 (9)	50 (29)	4.846 (710)	1.476 (416)	0 (0)	0 (0)	389 (125)	229 (122)	5.783 (68)	267 (90)	0 (0)	6,9 (2,6)	6.678 (376)
Schotter des Donautales	7	6,84 (0,32)	520 (180)	285 (104)	45 (27)	5.455 (1.890)	780 (289)	15 (28)	3 (1)	425 (224)	52 (83)	5.606 (613)	643 (325)	4 (3)	16,4 (8,2)	6.656 (831)
Schotter des Donaes. Ried.	3	6,30 (0,58)	976 (71)	239 (10)	60 (8)	9.780 (612)	3.480 (345)	13 (6)	0 (0)	358 (20)	23 (10)	320 (1.800)	11.407 (1.832)	4 (2)	12,0 (10,0)	12.848 (1.435)

6. 2. 9. Die Grundwässer des Quartärs

Die Grundwässer in den quartären Lockergesteinen haben trotz der unterschiedlichen Materialzusammensetzung eine sehr einheitliche chemische Beschaffenheit (Fig. 23 und Tabelle 10). Sie enthalten vorwiegend Calcium und Hydrogencarbonat. Stärkeren Schwankungen unterliegt das Magnesium, wobei das Mg/Ca-Verhältnis zwischen 0,16 und 0,34 variieren kann. Die Alkaliionen, von denen das Natrium deutlich überwiegt, sind mit 3 bis 4,5 mval-% nur von untergeordneter Bedeutung; Eisen und Mangan treten nur in Spuren auf. Bei den Anionen sind neben dem Hydrogencarbonat noch das Chlorid und das Nitrat anzuführen. Die Gesamtmineralisierung der quartären Grundwässer beträgt im Mittel rund 7000 $\mu\text{val/l}$. Die pH-Werte liegen relativ konstant zwischen 7,2 und 7,5.

Zur näheren Charakterisierung der einzelnen quartären Grundwasserbereiche eignet sich vor allem die Mineralisierung sowie der relative Magnesiumanteil. Den geringsten Gehalt an ionisierten Stoffen (6300 $\mu\text{val/l}$) weisen die Wasseraustritte im Bereich der Reißmoränen auf, was auf eine gewisse Entkalkung dieser Ablagerungen hinweist. Die Wässer sind außerdem durch niedrigere Magnesiumwerte (13 mval-%) sowie geringe Gehalte von Alkali- und Sulfationen gekennzeichnet. Demgegenüber haben die Grundwässer im Bereich der Würmmoränen einen um 700 $\mu\text{val/l}$ höheren Salzgehalt. Ihr Magnesiumanteil liegt bei 24 mval-%.

Eine noch höhere Mineralisierung findet man bei den Grundwässern des oberen Stockwerkes der würmeiszeitlichen Kiese und Schotter des nördlichen Hegaus. Der Gehalt an gelösten ionisierten Stoffen beträgt 7265 $\mu\text{val/l}$. Dadurch unterscheiden sie sich auch von den schwächer mineralisierten Wässern (6678 $\mu\text{val/l}$) in den

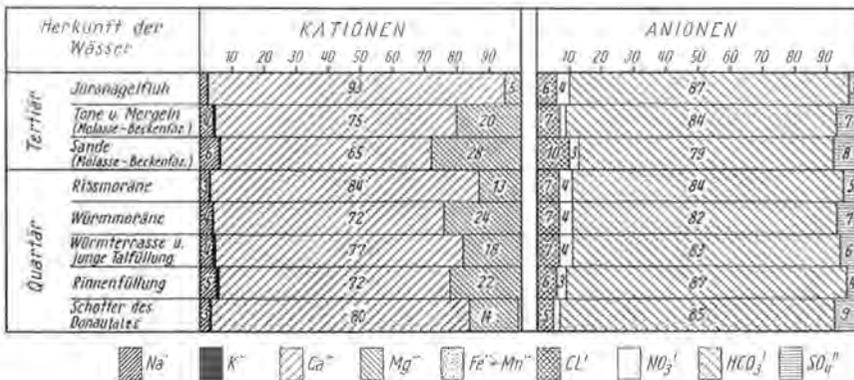


Fig. 23: Durchschnittliche Ionenverteilung in mval-% der Grundwässer in den tertiären und quartären Ablagerungen.

tiefere Rinnenschottern. Beide werden zum Teil durch das Karstwasser aus den Malmkalken alimentiert, das einen noch geringeren Salzgehalt hat. Man kann aus der unterschiedlichen Mineralisierung auf eine größere Karstwasserkomponente in den Wässern der Rinnenfüllung schließen.

Die Grundwässer in den Schottern des Donautales weisen einen niederen Magnesiumgehalt (14 mval-%) auf. Ihre Mineralisierung beträgt im Mittel 6650 $\mu\text{val/l}$. Völlig davon abweichende Grundwässer finden sich im Bereich des Donaueschinger Riedes. Dort tritt der Hydrogenkarbonatanteil fast völlig zugunsten des Sulfats zurück. Es ist dies weitgehend eine Folge der Gipsauslaugung im direkt unterlagernden Mittleren Keuper. Die Gesamtmineralisierung dieser Wässer erreicht über 13.000 $\mu\text{val/l}$.

6. 3. Typisierung der Grundwässer

Die Beschaffenheit der Grundwässer im Untersuchungsgebiet läßt sowohl hinsichtlich der Lösungsgenossen als auch des Lösungsinhaltes weitgehende Übereinstimmung einzelner Wässer erkennen. Diese werden zweckmäßigerweise zu Gruppen zusammengefaßt. Kriterien zur Abgrenzung solcher Gruppen sind die Ionenverteilung, die Mineralisierung und der Sauerstoffgehalt. Die Typenaufstellung erfolgt nach hydrogeologischen Gesichtspunkten, und zwar in Abhängigkeit des geologischen Körpers, der für die chemischen Eigenschaften des Wassers bestimmend ist.

6. 3. 1. Die Gliederung nach der Ionenverteilung

Die prozentuelle Zusammensetzung der wichtigsten Lösungsgenossen in den verschiedenen Grundwässern des Untersuchungsgebietes geht aus der Fig. 24 hervor. Das 3lineare Diagramm (J. HEM, 1959, und H. LANGGUTH, 1966) zeigt in den beiden OSANNschen Dreiecken die Reaktionsverhältnisse getrennt für die Kationen und für die Anionen; im Vierstoffdiagramm kommt die Beziehung zwischen den Alkalien und Erdalkalien, dem Karbonat und Hydrogenkarbonat sowie dem Sulfat, Chlorid und Nitrat zum Ausdruck. In den Diagrammen sind die einzelnen hydrogeologischen Einheiten jeweils nur einmal, und zwar mit den aus den zugehörigen Quellwässern ermittelten Durchschnittswerten, vertreten.

Fig. 24 zeigt deutlich die nahe Verwandtschaft der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Wässer. Diese beruht vor allem auf der Dominanz der Erdalkalien bei den Kationen sowie auf der Vorrangstellung des Hydrogenkarbonats bei den Anionen. Für die Untergliederung der Grundwässer nach der Ionenverteilung wurde dem Einteilungsvorschlag von H. LANGGUTH (1966) gefolgt. Im einzelnen können im Arbeitsgebiet unterschieden werden:

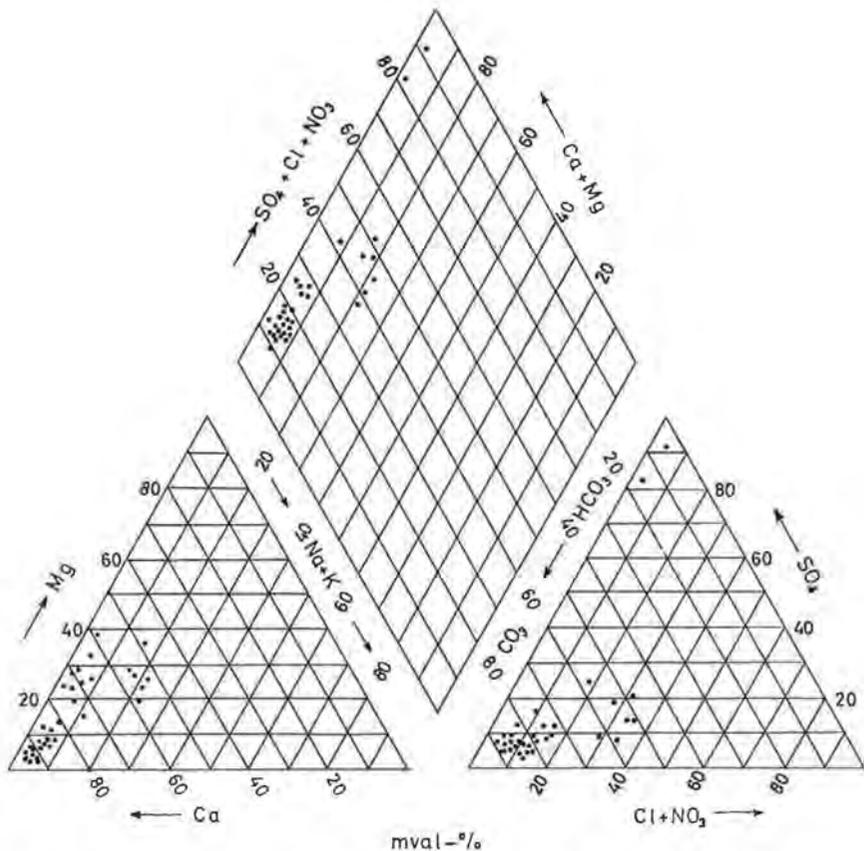


Fig. 24: Zusammensetzung der Grundwässer im Einzugsgebiet der obersten Donau. Die einzelnen Punkte stellen jeweils Mittelwerte von allen Quellen aus gleichem stratigraphischem Niveau dar.

1. normale erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer,
2. normale erdalkalische, hydrogenkarbonatisch-sulfatische Wässer,
3. normale erdalkalische, überwiegend sulfatische Wässer und
4. erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer mit höherem Alkali Gehalt.

Die Mehrzahl der Grundwässer gehört zur ersten Gruppe. Sie sind an die verschiedenen karbonatischen Gesteine gebunden, die im Arbeitsgebiet auch die größte Verbreitung haben. Zur zweiten Gruppe zählen die Grundwässer im Bereich des Buntsandsteines sowie des Doggers α . Sie sind durch den Rückgang des Hydrogenkarbonats zugunsten des Sulfats und Chlorids gekennzeichnet. Sie leiten zur Gruppe vier, den Grundgebirgswässern über, die im wesentlichen der Gruppe zwei entsprechen, aber Alkaliwerte von über 20 mval-%

aufweisen. Zur Gruppe drei gehören die Quellwässer aus dem gipsführenden Keuper sowie das Grundwasser im Bereich des Donaueschinger-Riedes, das ebenfalls in einem engen Kontakt zum Gipskeuper steht.

6. 3. 2. Die Gliederung nach dem Salzgehalt

Neben der Ionenverteilung wird in der Literatur die Mineralisierung als häufigstes Einteilungsprinzip zur Untergliederung der natürlichen Wässer verwendet. Da in diesen im allgemeinen die Verbindungen der Erdalkalien mit dem Hydrogenkarbonat bzw. dem Sulfat dominieren, entsprechen dieser Einteilung weitgehend auch die verschiedenen Gliederungen nach den Härtegraden.

In Fig. 25 sind die Mittelwerte der Gesamtmineralisierung für die einzelnen hydrogeologischen Einheiten in Abhängigkeit von den $\text{mval-}^0/\text{l}$ -Werten der Erdalkalien bzw. des Hydrogenkarbonats aufgetragen.

Die Häufung der Punkte im Bereich zwischen 5 bis 8 mval/l weist auch hier wieder auf die weitgehende Übereinstimmung der verschiedenen Grundwässer hin. Von dieser recht einheitlichen Gruppe heben sich die weichen Wässer des Grundgebirges und des Buntsandsteines mit einem Gehalt an gelösten ionisierten Stoffen von weniger als 1 mval/l (Rötwasser 1,8 mval/l) deutlich ab. Mit 3,7 mval/l nehmen die Quellen des Doggers α eine Zwischenstellung ein. Nach oben weichen nur die Gipswässer des Keupers und des Donaueschinger Riedes ab.

Aus den Diagrammen (Fig. 24) ist auch die weitgehende Unabhängigkeit der Ionenverteilung von der Mineralisierung zu erkennen.

6. 3. 3. Die Gliederung nach dem Reduktions-Oxydations-Zustand

Die Untergliederung der Wässer nach dem Reduktions-Oxydations-Zustand stellt ein zusätzliches Einteilungsprinzip dar, dem aus korrosionstechnischen Gründen eine gewisse technische und wasserwirtschaftliche Bedeutung zukommt. Nach L. GERB (1953 und 1958) werden normale und reduzierte Wässer unterschieden, wobei jedem Grundwassertyp ein Reduktionstyp zugeordnet werden kann. Unter reduzierten Wässern werden solche verstanden, die auf ihrem unterirdischen Lauf Zonen passiert haben, in denen reduzierende, sauerstoffverbrauchende Vorgänge überwiegen. Der Reduktions-Oxydations-Zustand kann nach L. GERB durch den Gehalt eines Wassers am freien Sauerstoff beurteilt werden, wobei die reduzierten Wässer im allgemeinen weniger als 6 mg/l freien Sauerstoff enthalten.

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde der Sauerstoffgehalt der Grundwässer nicht bestimmt. Einzelne Vergleichswerte aus den Analysenunterlagen des Wasserwirtschaftsamtes in Donaueschingen sowie vor allem die vom Sauerstoffgehalt mehr oder weniger abhängigen

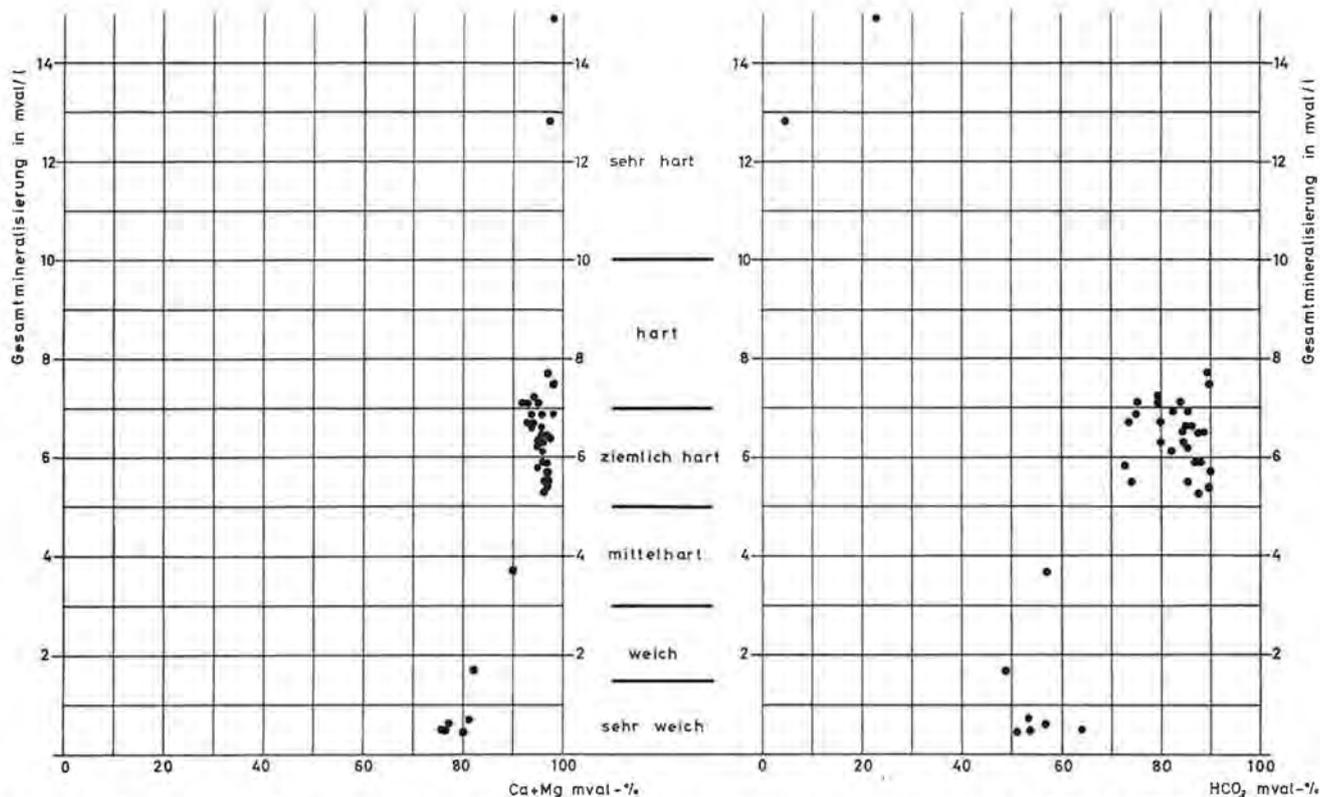


Fig. 25: Gesamtmineralisierung der verschiedenen Wässer des Untersuchungsgebietes in Abhängigkeit von den Erdalkali- (links) und den Hydrogenkarbonationen (rechts). Die einzelnen Punkte stellen jeweils Mittelwerte von allen Quellen aus gleichem stratigraphischem Niveau dar.

Lösungsgenossen Eisen, Mangan, Nitrat sowie das Sulfat zeigen jedoch, daß im Untersuchungsgebiet überwiegend normale, nicht reduzierte Wässer auftreten. Reduzierte Wässer finden sich gelegentlich im Bereich der Verebnungsfläche des Oberen Buntsandsteines, im Bereich der Keuperniederungen sowie stellenweise im Bereich der jungen Talfüllungen und im Moränengebiet des Hegaus.

6. 3. 4. Die numerische Klassifikation

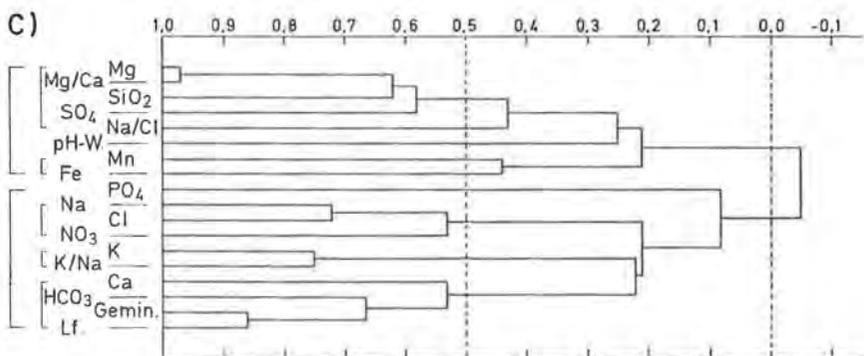
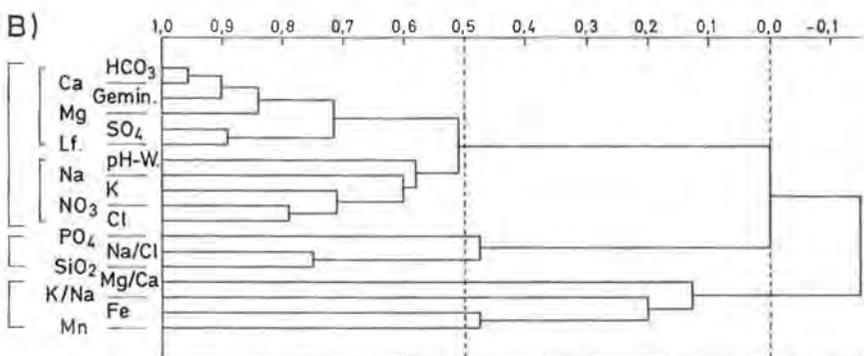
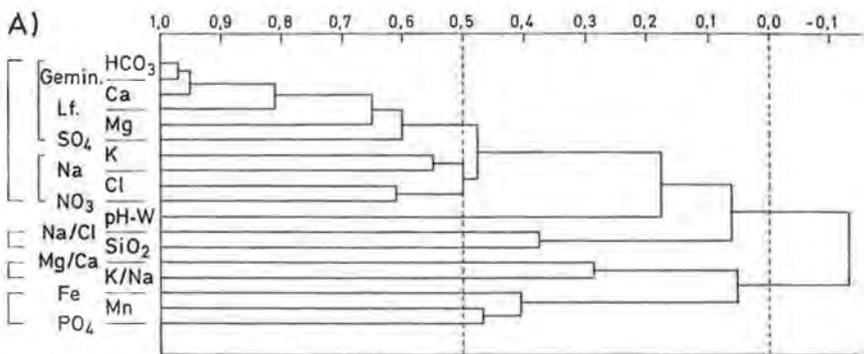
Den bisher genannten drei Verfahren zur Gliederung der verschiedenen Wässer liegen Kriterien zugrunde, die in den letzten beiden Fällen auf einer einzigen Größe und bei der Ionenverteilung auf einem Vierstoffdiagramm beruhen. Für eine optimale Unterscheidung liegt es nahe, sich nicht auf wenige Kenngrößen zu beschränken, sondern möglichst alle beobachteten und gemessenen Werte zu berücksichtigen. Bei einer großen Merkmalzahl ist es allerdings kaum noch möglich, die Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen den numerisch gekennzeichneten Objekten zu überblicken. Es wird daher ein multivariates Verfahren benötigt, das den Grad der Übereinstimmung zwischen den Objekten quantitativ erfaßt.

Ein solches Verfahren stellt die Clusteranalyse dar. Sie geht von der Koeffizientenmatrix eines beliebigen Ähnlichkeitsmaßes, zum Beispiel dem Korrelations- oder Distanzkoeffizienten, aus. Durch das schrittweise Zusammenziehen der einander am meisten entsprechenden Objekte wird eine hierarchische Gruppierung (Fig. 26) erreicht, die in einer einfachen, zweidimensionalen Form dargestellt werden kann. Zur Clusterung des vorliegenden Datenmaterials wurde ein Computer-Programm von R. B. McCAMMON & G. WENNINGER (1970) benutzt. Dieses Programm rechnet nach der „Unweighted Pair Group“-Methode und erzeugt auf einem mit dem Computer gekoppelten XY-Plotter das hierarchisch aufgebaute Dendrogramm.

Um Aufschluß über die Beziehung der chemischen Kennwerte untereinander zu erhalten, wurden zunächst die 18 Merkmale selbst einer Clusteranalyse (R-Technik) unterzogen. Die Gruppierungen werden hierbei in erster Linie von den zu vergleichenden Wässern abhängen. Bezieht man verschiedene, im Untersuchungsgebiet auftretende Wassertypen in die Auswertung mit ein, dann bilden die durch relativ hohe Werte hervortretenden Ionen des Calciums, Magnesiums, Hydrogenkarbonats und des Sulfats zusammen mit der Gesamtmine-

Fig. 26: Clusterdiagramm mit hierarchischer Gruppierung der 18 chemischen Kennwerte, die zur Charakterisierung der Grundwässer herangezogen wurden.

- A) Berechnet aus 980 Wasserproben aus dem gesamten Untersuchungsgebiet.
- B) Berechnet aus 77 Proben aus dem Bereich des Meßtischblattes 8016 (Donaueschingen).



C) Berechnet aus 112 Proben aus dem Bereich der Malmkalke.

Auf der Abszisse ist von links nach rechts abnehmend der Korrelationskoeffizient aufgetragen. Die dazu senkrechten Verbindungslinien von zwei Kennwerten bzw. Gruppen markieren, bezogen auf die Skala, den Grad der Übereinstimmung (berechnet als mittlere gruppeninterne Korrelation) innerhalb der Elemente der neugebildeten Gruppe.

ralisierung und der Leitfähigkeit eine einheitliche Gruppe. Mit ihr eng verbunden ist eine zweite, die sich aus den Alkaliionen, dem Chlorid und dem Nitrat zusammensetzt. Die übrigen Kennwerte, die mehr oder weniger stark in Teilgruppen aufgesplittert sind und deren Ähnlichkeiten auch untereinander vielfach nicht signifikant sind, stehen zu den beiden erstgenannten Gruppen in keiner korrelierten Beziehung. Dies ergibt sich sowohl beim Vergleich aller Proben aus dem Untersuchungsgebiet (Fig. 26A) als auch bei Proben aus einem begrenzten Gebiet, in dem unterschiedliche Grundwassertypen auftreten (Fig. 26B). Bei der Clusterung der Merkmale an Hand von Wässern eines einzigen Typs kommen in den Beziehungen zwischen den Gruppen spezifische Trends zum Ausdruck. Führt man dies für die Wässer des Oberen Jura durch, erhält man eine Hauptgruppe mit dem Magnesium und dem Sulfat sowie dem Mg/Ca- und dem N/Cl-Verhältnis. Diese Gruppe weist eine schwach negative Korrelation zur anderen Hauptgruppe mit dem Calcium und Hydrogenkarbonat auf. Zur Erklärung dieser gegenläufigen Beziehungen wird man Ionenaustauschvorgänge heranziehen können.

Die Clusteranalyse der Wässer in Abhängigkeit von ihrer chemischen Beschaffenheit (Q-Technik) führt zu Gruppen, die im wesentlichen von der Zugehörigkeit der Wässer zu mineralogisch-petrographisch einheitlichen Grundwasserkörpern bestimmt werden (Fig. 27). Sie bestätigt damit die Berechtigung geologischer Kriterien bei der Aufstellung von Grundwassertypen und ist bei deren Abgrenzung von großer Hilfe.

6. 3. 5. Die Grundwassertypen

Die Untergliederung der Wässer nach rein chemischen Gesichtspunkten bietet ohne Zweifel eine ideale Möglichkeit einer Typisierung frei von lokalen und regionalen Besonderheiten. Eine solche Einteilung ist aber ausschließlich auf das Wasser bezogen, ohne die Herkunft des Wassers aus dem, seinen Chemismus bestimmenden Gesteinskörper zu berücksichtigen. Gerade für eine hydrogeologische Betrachtung empfiehlt sich aber eine Typisierung, die der Abhängigkeit der typbestimmenden Eigenschaften von der chemisch-petrographischen Zusammensetzung des zugehörigen geologischen Körpers Rechnung trägt. Im nachfolgenden soll im Sinne von L. GERB (1953 und 1958) von einem Typ gesprochen werden, wenn sich zwischen den Eigenschaften gleichartiger Wässer und denen des geologischen Körpers eine eindeutige Zuordnung herstellen läßt.

Ähnliche Gesichtspunkte wurden auch bei der Typeneinteilung von F. NÖRING (1951) und H. FAST & K. SAUER (1958) berücksichtigt. Zwangsläufig unterliegt eine solche Gliederung in ihrer Gültigkeit und Aussage einer regionalen Beschränkung. Sie wird aber im einzelnen der Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse eines bestimmten Gebietes besser gerecht.

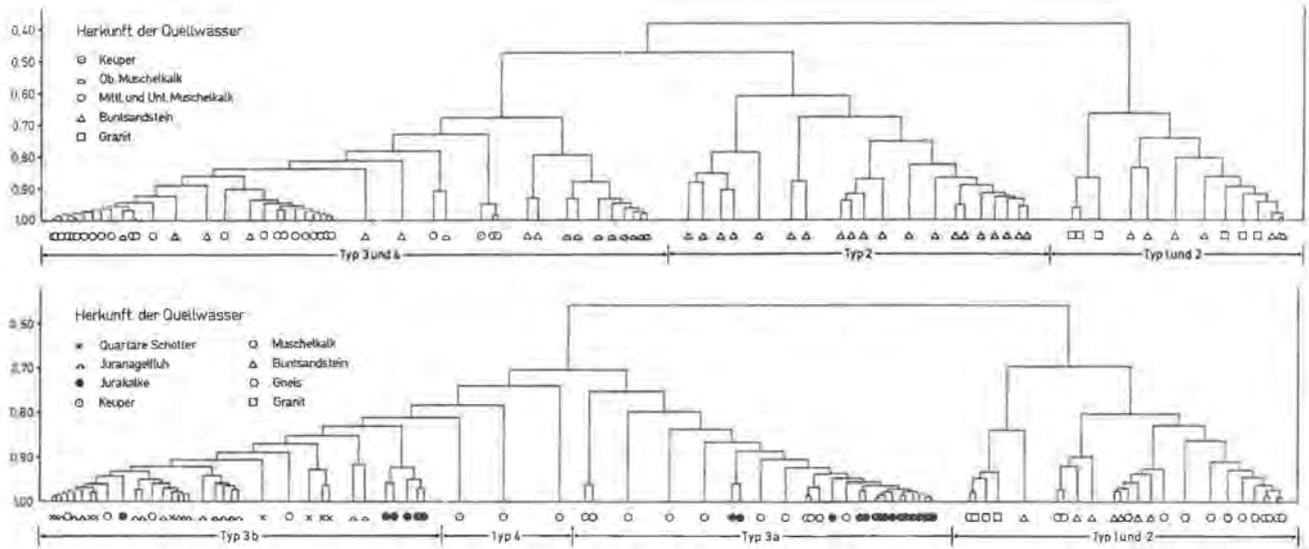


Fig. 27: Clusterdiagramm mit hierarchischer Anordnung der verschiedenen Quellen aufgrund ihrer Übereinstimmung in den chemischen Kennwerten.

Oberes Diagramm: Clusterung von 77 Quellen aus dem Bereich des Meftischblattes 8016 (Donauesschingen).
 Unteres Diagramm: Clusterung von 89 Quellen aus einem 10 km breiten Ost—West verlaufenden Gebietsstreifen quer durch das Untersuchungsgebiet.

Die zur Korrelationskoeffizientenskala senkrechten Linien markieren wieder den Grad der Übereinstimmung (berechnet als mittlere gruppeninterne Korrelation) der einzelnen Elemente innerhalb der neugebildeten Gruppe. Die Länge der Verbindungslinien zwischen den Quellpaaren bzw. den Quellgruppen ist proportional dem Grad der zwischen den beiden zu verbindenden Gruppen auftretenden Korrelation (berechnet als mittlerer Zwischengruppen-Korrelationskoeffizient).

Die Typbezeichnungen beziehen sich auf die im Abschnitt 6.3.5. definierten Grundwassertypen: Typ 1 = Grundgebirgswässer, Typ 2 = Buntsandsteinwässer, Typ 3a = niederminalisierte Karbonatgesteinswässer, Typ 3b = hochmineralisierte Karbonatgesteinswässer und Typ 4 = Gipswässer.

Nach der prozentuellen Zusammensetzung der Lösungsgenossen und dem Gesamtlösungsinhalt lassen sich in Abhängigkeit von der jeweiligen chemischen Beschaffenheit des Grundwasserträgers im Bereich der obersten Donau die im folgenden angeführten Typen unterscheiden:

Grundgebirgswässer: Sehr weiche, erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer mit höherem Alkaligehalt. Regelmäßiger Kohlen säureüberschuß führt beim gleichzeitigen Fehlen der Hydrogenkarbonatpufferung zu pH-Werten im sauren Bereich. Dieser Typ entspricht den Kristallinwässern von L. GERB (1958) sowie den mineralarmen Grundgebirgs- und Kristallinwässern von H. FAST & K. SAUER (1958).

Buntsandsteinwässer (H. FAST & K. SAUER, 1958): Sehr weiche bis weiche, normal erdalkalische, hydrogenkarbonatisch-sulfatische Wässer. Neben dem Normaltyp tritt häufig die reduzierte Form mit hohen Eisengehalten auf.

Karbonatgesteinswässer: Ziemlich harte, erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer. Sie sind in nieder (<6,5 mval/l) und höher mineralisierte (> 6,5 mval/l) Wässer zu untergliedern, wobei die ersteren hydrogeologisch als Kluft-, die letzteren als Porenwässer definiert werden können. Diese Aufteilung, die der petrographischen Zuordnung in Wässern der festen Karbonatgesteine sowie der lockeren im weitesten Sinne (einschließlich Kalke mit mächtigen Auflockerungszonen) entspricht, ist allerdings nur bedingt gültig. So beträgt die Mineralisierung der Wässer des klüftigen Muschelkalkes durchwegs über 6,5 mval/l.

Der Karbonatgesteinstyp deckt sich weitgehend mit den Karbonatwässern von F. NÖRING (1951). Die Untergliederung ist vergleichbar der Trennung der Kalkalpen- und Kalkschotterwässer von L. GERB (1953 und 1958), der auf das unterschiedliche Kalk-Kohlensäure-Verhältnis hinweist.

Gipswässer: Sehr harte, erdalkalische, überwiegend sulfatische Wässer von meist reduziertem Typ. Sie sind im Untersuchungsgebiet fast ausschließlich an die gipsführenden Schichten des Keupers gebunden, während sie im Bereich des Mittleren Muschelkalkes auf Grund der schon erfolgten Auslaugung weitgehend fehlen.

Nicht in diese Typisierung einbezogen wurden die „Tiefenwässer“ des Untersuchungsgebietes, unter denen hier die Grundwässer verstanden werden, die wesentlich unter dem Vorflutsystem liegen und dort weitgehend stagnieren. Sie sind im wesentlichen durch hohe Natrium- und Sulfat- bzw. Chloridwerte ausgezeichnet.

6. 4. Die kartenmäßige Darstellung der hydrochemischen Daten

Mit der hydrochemischen Karte hat sich zuletzt eingehend H. LANGGUTH (1966) befaßt, der auch auf die ältere, dieses Thema behandelnde Literatur eingeht. Zur Darstellung der chemischen Kennwerte werden heute vielfach nebeneinander die punktförmige Darstellung, die punktförmige Diagrammdarstellung und die flächenhafte Darstellung angewandt.

Welchem Verfahren im einzelnen der Vorzug zu geben ist, hängt wohl von der jeweiligen Zielsetzung und Fragestellung ab. Punktförmige Diagrammdarstellungen, besonders bei Berücksichtigung vieler Bestandteile, sollten nur bei großmaßstäblichen Karten angewandt werden, wo es möglich ist, weitgehend alle Wasseraustritte eines Gebietes zu berücksichtigen. Wird nur eine Auswahl von einzelnen Quellen eingetragen, dann kommt es meist zu einem verzerrten Bild, da es bei der Vielfalt der Zusammensetzung und der Schwankungen natürlicher Wässer kaum möglich ist, die auf engem Raum wechselnden Beziehungen des Mehrkomponentensystems durch die Kennwerte einer einzelnen Entnahmestelle zu charakterisieren. Hier wäre es dann günstiger, für einzelne Bereiche Mittelwerte anzugeben.

Bei einer punktförmigen Einzeldarstellung sowie auch bei der flächenhaften Darstellung scheiden diese Bedenken aus. Sie haben jedoch den Nachteil, daß für jedes zu betrachtende Merkmal eine eigene Karte erforderlich ist.

Bei der hier vorliegenden Untersuchung wurde der flächenhaften Darstellung der Vorzug gegeben, um die regionalen Tendenzen deutlicher herausarbeiten zu können. Zur Ermittlung der Isolinien wurde eine möglichst exakte Interpolation unter Berücksichtigung aller Daten angestrebt. Der Umfang der für die Interpolation des großen Datenmaterials notwendigen Berechnungen machte die Verwendung einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage erforderlich. Zur Ermittlung und Zeichnung der Isolinien eines Merkmales aus den unregelmäßig verteilten Beobachtungen wurde das Programm HLUP von W. PENN (1970) benützt.

Dieses Programm baut zuerst durch die Verbindung der einzelnen benachbarten Punkte ein Dreiecksnetz auf. Die Dreiecke werden so verbunden, daß die gemeinsame Seite zweier benachbarter Dreiecke die kurze Diagonale des von den beiden Dreiecken gebildeten Vierecks ist. Die Interpolation erfolgt linear. Durch die drei räumlichen Punkte eines jedes Dreiecks, die durch die jeweiligen Beobachtungswerte bestimmt sind, wird eine Ebene gelegt. Die Höhenlinien dieser Ebene sind dann äquidistante, parallele Geraden. An der gemeinsamen Grenze zweier Dreiecke ergibt sich dann im allgemeinen ein Knick, aber kein Sprung. Ungenauigkeiten können am jeweiligen Bildrand auftreten.

Die Tafeln III bis V zeigen Beispiele für solche vom Computer errechneten und mittels des automatischen Zeichengerätes hergestellten Isolinienkarten. Die Karten der genannten Beilagen umfassen jeweils den Bereich der Meßtischblätter Donaueschingen (Blatt Nr. 8016) und Geisingen (Blatt Nr. 8017). Grundlage für die genaue Ortsangabe bilden die Rechts- und Hochwerte, die in dem rechtwinkligen kartesischen Achsenkreuz eingetragen sind. Die Unterteilung der Abszisse dient gleichzeitig als Maßstab; die einzelnen Einheiten entsprechen jeweils 1 km. Dargestellt sind die Isolinien für den pH-Wert (Tafel III),

für den Calciumgehalt (Tafel IV) und für das Sulfat (Tafel V). Der Abstand der Isolinien beträgt beim pH-Wert 0,1, beim Calcium und Sulfat jeweils 500 $\mu\text{val/l}$. Um die Übersichtlichkeit nicht durch zu viele Zahlen zu mindern, wurden nur die Maxima und Minima eingetragen. Ergänzend liefern die Pfeile Angaben über die Gefällsrichtung. Die Position der einzelnen Beobachtungspunkte ist durch ein y gekennzeichnet. Der von den drei Karten (Tafel III bis V) erfaßte Bereich hat Anteil an der Nord-Süd streichenden Zone der mesozoischen Schichtfolge, und zwar vom Buntsandstein bis zum Malm. Entsprechend der chemischen Beschaffenheit der zugehörigen Grundwassertypen ist die Verbreitung der Buntsandsteinzone im Westen bei den niederen pH-, Calcium- und Sulfatwerten deutlich zu erkennen. Die Muschelkalkzone hebt sich ab durch ihre mittleren Calciumwerte, zwischen den niederen des Buntsandsteinbereiches und den hohen Werten der Keuperzone. Die Verbreitung der Keuperzone, ohne den Lettenkeuper, der hydrochemisch eng mit dem Muschelkalk verbunden ist, wird vor allem aus der Verteilung der überhöhten Sulfatwerte ersichtlich. Im Ostteil der Karten, im Verbreitungsgebiet von Lias, Dogger und Malm, ist dagegen bei dem gewählten Isolinienabstand keine weitere Untergliederung möglich. Dies entspricht dem Vorkommen der diesen Schichten gemeinsam zugeordneten, recht einheitlichen Karbonatgesteinswässer.

Die automatische, kartenmäßige Auswertung der hydrochemischen Daten ermöglicht eine rasche Erfassung der räumlichen Abhängigkeiten aller chemischen Kennwerte. Da bei einem großen Beobachtungsmaterial bereits zur statistischen Auswertung eine computergerechte Datenaufbereitung (zum Beispiel Lochkartenkartei) notwendig ist, können solche „Arbeitskarten“ unter Benützung vorhandener Programme innerhalb kurzer Zeit angefertigt werden. Für die hydrogeologische Aussage stellen sie eine wertvolle Ergänzung dar und sind bei der Erfassung und Abgrenzung der Grundwassertypen bzw. bei der Einordnung der verschiedenen Quellwässer von großer Hilfe.

6. 5. Faktorenanalytische Auswertung

Der häufige Wechsel in der chemischen Zusammensetzung der Grundwässer wird bedingt durch die räumliche aber auch zeitliche Veränderung der die Beschaffenheit des Wassers verursachenden Faktoren. Die jeweilige Merkmalausbildung, zum Beispiel die Verteilung der Lösungsgenossen, gibt uns zwar ein getreues Abbild von der wechselnden Intensität jener Faktoren, doch sind sie selbst bzw. die genaue Art der Merkmalabhängigkeit vielfach unbekannt. Ihre Identifizierung wird dadurch erschwert, daß die Merkmale meist nicht nur von einem, sondern gleichzeitig von mehreren Faktoren abhängig sind. Der Einfluß der einzelnen Faktoren auf die Ausbildung eines Merkmales wird dabei von unterschiedlichem Gewicht sein.

Die gleichzeitige Abhängigkeit der Variablen von einem oder mehreren gemeinsamen Faktoren bewirkt jene Beziehung zwischen zwei Merkmalen, die durch die Ähnlichkeitskoeffizienten erfaßt wird. Nur in den seltensten Fällen wird es aber möglich sein, direkt aus einer Koeffizientenmatrix jenes System von Faktoren herauszulesen, welches die vielfältigen Beziehungen zwischen den Merkmalen zu erklären vermag.

Hier kann die Faktorenanalyse weiterhelfen. Man versteht darunter ein mathematisches Verfahren, das aus einer Vielzahl beobachteter Variablen hypothetische Größen ableitet, die die auftretenden Beziehungen zwischen den Variablen hinreichend genau reproduzieren. Diese hypothetischen Größen oder Faktoren können unter bestimmten Voraussetzungen im Sinne von realen Entsprechungen interpretiert werden.

Da ein Faktor nicht für alle Variablen dieselbe Bedeutung hat, ist die Größe einer Variablen sowohl von dem Gewicht (Bedeutung) und der jeweils herrschenden Intensität der Faktoren abhängig. Anders ausgedrückt: Eine bestimmte Merkmalausprägung (i) einer Probe (j) wird bestimmt durch die Summe der Produkte von Gewichtszahl (a_{ik}) und Intensität (c_{kj}) aller f beteiligten Faktoren.

$$x_{ij} = a_{i1} \cdot c_{1j} + a_{i2} \cdot c_{2j} + \dots + a_{ik} \cdot c_{kj} + \dots + a_{if} \cdot c_{fj}$$

Bei gewissen Einschränkungen, wie der Voraussetzung von unabhängigen Faktoren, läßt sich daraus ableiten (H. HARMAN, 1960), daß die Korrelation zweier Merkmale gleich der Summe der Produkte der Gewichtszahlen (= Faktorenladungen) gleicher Faktoren ist.

$$r_{ij} = a_{i1} \cdot a_{j1} + a_{i2} \cdot a_{j2} + \dots + a_{if} \cdot a_{jf}$$

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^f a_{ik} \cdot a_{jk}$$

Diese Aussage stellt das Fundamentaltheorem der Faktorenanalyse dar. Die rechnerische Ableitung von Faktoren geht daher von der Korrelationsmatrix aus.

Die Durchführung einer Faktorenanalyse erfolgt in mehreren Rechenschritten. Eine Zusammenfassung der verschiedenen Möglichkeiten sowie deren mathematische Ableitung findet man bei H. HARMAN (1960) und K. ÜBERLA (1968). Im nachfolgenden soll nur das Wesentlichste der einzelnen Schritte erläutert sowie die hier gebrauchten Verfahren angeführt werden.

Schätzung der Kommunalität: Da die Faktorenanalyse nur jene Faktoren berücksichtigt, die zwei oder mehreren Variablen gemeinsam sind, ist zuerst eine Veränderung der Diagonalelemente der Korrelationsmatrix vorzunehmen. Diese geben die Einheitsvarianz (= 1) einer Variablen wieder, die sich aus der Kommunalität (= Varianzanteil, der von Faktoren

verursacht wird, die gleichzeitig mehrere Variable beeinflussen) und der Einzelvarianz (= Varianzanteil des Einzelrestfaktors) zusammensetzt. Die Diagonalelemente werden daher um den Anteil der letzteren reduziert. Der verbleibende Rest, die Kommunalität (h^2) entspricht gleichzeitig der Summe der quadrierten Ladungen der gemeinsamen Faktoren.

Für die Verwendung von h^2 in der Diagonale muß zunächst eine Schätzung vorgenommen werden, da sich die exakten Werte erst aus den zu errechnenden Faktorenladungen ergeben. In unserem Fall werden hierfür die Quadrate der multiplen Korrelationskoeffizienten eingesetzt. Diese Schätzwerte werden durch eine Anzahl zusätzlicher Iterationen verbessert, indem jeweils die Faktorenmatrix ermittelt und die daraus errechneten Kommunalitäten als neue Schätzwerte Verwendung finden.

Berechnung der Faktorenmatrix: Aus der abgeänderten Korrelationsmatrix lassen sich voneinander unabhängige Faktoren mittels der Hauptachsenanalyse extrahieren. Das Prinzip dieser Methode ist durch ein geometrisches Modell zu veranschaulichen. In diesem werden die Variablen als Punkte in einem von den n -Objekten aufgespannten n -dimensionalen Raum verstanden. Die sich aus den Variablen ergebende Punktwolke wird dann durch ein neues Koordinatensystem beschrieben, das parallel zu den Hauptrichtungen der Punktwolke durch ihren Schwerpunkt gelegt wird. Die aufeinander rechtwinkligen Koordinaten sind die zu extrahierenden, voneinander unabhängigen Faktoren. Ihr Varianzanteil ist proportional zur Länge der jeweiligen Hauptachse. Der erste Faktor vereinigt auf sich ein Maximum an Varianz; die nachfolgenden bilden jeweils ein Maximum in bezug auf die Restvarianz. Rechnerisch handelt es sich hierbei um eine Eigenwertaufgabe (zum Beispiel R. ZURMÜHL, 1964). Die Eigenwerte und Eigenvektoren der Korrelationsmatrix sind zu bestimmen.

Orthogonale Rotation der Faktorenmatrix: Die Faktorenmatrix erbringt kein eindeutiges Bild, sondern hat unendlich viele äquivalente Lösungen, die alle die zwischen den Variablen beobachteten Beziehungen gleich gut wiedergeben. So erhält man durch die Hauptachsenanalyse Faktoren, die zwar jeweils ein Maximum an Varianz auf sich vereinigen, die aber in bezug auf die Variablen nicht immer eine eindeutige Position einnehmen und dann nur schwer zu interpretieren sind. Durch Rotation des von den Faktoren gebildeten Koordinatensystems kann aber eine Vereinfachung des Abhängigkeitsschemas erreicht werden, wenn die Drehung so durchgeführt wird, daß die Koordinaten möglichst durch die von den Variablengruppen markierten Punktanhäufungen hindurchgehen. Für die Rotation wird heute meist die von H. F. KAISER (1958) entwickelte Varimax-Methode verwendet. Bei diesem Verfahren wird der Grad der Einfachheit eines Faktors durch die Varianz seiner quadrierten Ladungen bestimmt. Ist diese ein Maximum, so hat der Faktor die größte Einfachheit, das heißt, er wird für einzelne Variable hohe Ladungen aufweisen, während die übrigen durch sehr niedrige Werte gekennzeichnet sind.

Zur Berechnung der Korrelationskoeffizienten- und der Faktorenmatrix einschließlich der orthogonalen Rotation wurde das Programm PAFA von P. SCHNELL & F. GEBHARD (1966) benützt. Die Durchführung der Rechenarbeiten erfolgte auf der IBM 7094 des Deutschen Rechenzentrums in Darmstadt.

Die aus den Analysendaten ermittelte Korrelationskoeffizientenmatrix (Produktmomentkorrelation) für die verschiedenen physikalischen und chemischen Kennwerte (Tabelle 11) bietet bereits einen

Tabelle 11: Korrelationskoeffizienten-Matrix der chemischen und physikalischen Kennwerte für die verschiedenen Grundwässer im Einzugsgebiet der obersten Donau.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1 pH-Wert	1,00																		
2 Leitf.	0,79	1,00																	
3 Na	0,24	0,39	1,00																
4 K	0,14	0,23	0,18	1,00															
5 Ca	0,78	0,98	0,28	0,19	1,00														
6 Mg	0,75	0,95	0,39	0,28	0,90	1,00													
7 Fe	-0,07	0,06	0,12	-0,07	0,01	0,09	1,00												
8 Mn	0,21	0,36	0,26	0,05	0,29	0,44	0,73	1,00											
9 Cl	0,52	0,74	0,74	0,41	0,67	0,69	0,02	0,18	1,00										
10 NO ₃	0,45	0,59	0,58	0,26	0,53	0,50	0,03	0,14	0,77	1,00									
11 HCO ₃	0,79	0,98	0,28	0,21	0,99	0,95	0,03	0,34	0,64	0,47	1,00								
12 SO ₄	0,51	0,72	0,54	0,21	0,66	0,70	0,15	0,41	0,71	0,71	0,63	1,00							
13 PO ₄	0,08	0,08	-0,02	0,12	0,04	0,17	0,41	0,60	-0,07	0,02	0,09	0,08	1,00						
14 SiO ₂	0,25	-0,01	0,17	0,02	-0,01	-0,00	-0,09	-0,14	-0,04	-0,08	0,00	-0,05	-0,13	1,00					
15 GEMI*	0,79	0,99	0,34	0,23	0,99	0,95	0,04	0,35	0,70	0,55	0,99	0,70	0,09	-0,01	1,00				
16 Mg/Ca	-0,09	-0,02	0,59	0,11	-0,13	0,12	0,10	0,19	0,32	0,19	-0,09	0,22	0,04	-0,06	-0,04	1,00			
17 K/Na	-0,31	-0,28	-0,53	0,56	-0,26	-0,24	-0,06	-0,12	-0,25	-0,27	-0,25	-0,28	0,03	-0,31	-0,26	-0,18	1,00		
18 Na/Cl	-0,14	-0,30	0,23	-0,09	-0,32	-0,27	-0,05	-0,07	-0,30	-0,23	-0,29	-0,22	0,03	0,62	-0,30	0,11	-0,36	1,00	

* Gesamtmineralisierung

Überblick über die wechselnden Beziehungen zwischen den einzelnen Größen. Auffallend sind die vorwiegend positiven Korrelationen. Gerade bei den gelösten, ionisierten Stoffen bestehen untereinander keine negativen Abhängigkeiten, wodurch man bei den untersuchten Grundwässern auf das weitgehende Fehlen von Ionenaustauschvorgängen, die zu einem wechselnden Ersatz der Lösungsgenossen und damit zu einer negativen Korrelation führen, schließen kann. Nicht in die Untersuchungen miteinbezogen sind hier die Tiefenwässer, bei denen Austauschvorgänge eine wesentliche Rolle spielen.

Die aus dieser Korrelationskoeffizientenmatrix mittels der Hauptachsenanalyse berechneten Ladungen der einzelnen Kennwerte für die ersten fünf Faktoren sind auf der Tabelle 12 sowie für die nach der Varimaxmethode rotierten Faktoren in Tabelle 13 wiedergegeben. An der Gesamtvarianz haben die Einzelrestfaktoren einen Anteil von nur 7⁰/₀; somit entfallen 93⁰/₀ auf die Gesamtkommunalität. Als Kriterien zur Beendigung der Faktorenextraktion wurde das Unterschreiten der Einheitsvarianz gewertet. Fünf Faktoren blieben über dieser Grenze. Sie repräsentieren 89⁰/₀ der Gesamtkommunalität, wobei definitionsgemäß der erste Faktor mit 46⁰/₀ den größten Anteil auf sich vereinigt; die anderen folgen mit 14, 12, 10 und 7⁰/₀.

Der Faktor 1 weist positive Ladungen für fast alle Variablen auf, wobei der pH-Wert, die Leitfähigkeit, das Calcium, das Magnesium, das Chlorid, das Nitrat, das Bikarbonat, das Sulfat und die

Tabelle 12: Unrotierte Faktorenmatrix der chemischen und physikalischen Kennwerte der untersuchten Wässer des Einzugsgebietes der obersten Donau. Die Extraktion der Faktoren erfolgte mittels der Hauptachsenanalyse.

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5
1 pH-Wert	0,767	0,055	-0,218	-0,288	-0,153
2 Leitfähigkeit	0,974	0,133	-0,072	-0,132	-0,002
3 Na	0,536	-0,730	0,021	0,361	0,003
4 K	0,279	0,257	0,048	0,591	-0,703
5 Ca	0,931	0,220	-0,141	-0,206	0,013
6 Mg	0,943	0,103	0,030	-0,105	-0,091
7 Fe	0,114	-0,153	0,807	-0,161	0,063
8 Mn	0,414	-0,105	0,778	-0,187	-0,050
9 Cl	0,831	-0,161	-0,096	0,440	0,055
10 NO ₂	0,703	-0,177	-0,055	0,384	0,167
11 HCO ₃	0,930	0,213	-0,091	-0,237	-0,046
12 SO ₄	0,811	-0,143	0,101	0,181	0,123
13 PO ₄	0,126	0,024	0,728	-0,202	-0,282
14 SiO ₂	-0,006	-0,466	-0,348	-0,326	-0,486
15 GEMI*	0,961	0,169	-0,084	-0,165	-0,025
16 Mg/Ca	0,118	-0,484	0,196	0,424	0,060
17 K/Na	-0,322	0,685	0,158	0,404	-0,317
18 Na/Cl	-0,284	-0,678	-0,137	-0,276	-0,455

* Gesamtmineralisierung

Tabelle 13: Orthogonal rotierte Faktorenmatrix der chemischen und physikalischen Kennwerte der untersuchten Wässer des Einzugsgebietes der obersten Donau. Die Rotation erfolgte nach der Varimax-Methode von H. KAISER, 1958.

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5
1 pH-Wert	0,844	-0,182	-0,014	0,014	0,019
2 Leitfähigkeit	0,973	0,075	0,079	0,174	-0,003
3 Na	0,240	-0,257	0,066	0,904	0,074
4 K	0,194	-0,038	0,008	0,208	-0,952
5 Ca	0,983	0,088	0,018	0,050	0,020
6 Mg	0,918	0,035	0,181	0,194	-0,079
7 Fe	-0,040	0,104	0,821	0,114	0,134
8 Mn	0,266	0,063	0,851	0,155	0,040
9 Cl	0,630	0,140	-0,089	0,688	-0,155
10 NO ₃	0,509	0,183	-0,069	0,637	-0,035
11 HCO ₃	0,984	0,047	0,081	0,030	-0,007
12 SO ₄	0,643	0,144	0,148	0,530	0,016
13 PO ₄	0,056	-0,046	0,792	-0,083	-0,161
14 SiO ₂	0,081	-0,799	-0,128	-0,024	0,025
15 GEMI	0,981	0,066	0,075	0,119	-0,015
16 Mg/Ca	-0,146	-0,030	0,128	0,656	-0,017
17 K/Na	-0,265	0,384	-0,017	-0,340	-0,727
18 Na/Cl	-0,278	-0,863	0,039	0,081	0,105

Gesamtmineralisierung mit Ladungen von über 0,7 eine enge und direkte Abhängigkeit von diesem Faktor erkennen lassen (Fig. 28). Relativ unabhängig sind von diesem nur das Eisen, das Phosphat und die Kieselsäure. Schon auf Grund des hohen Varianzanteiles liegt es nahe, diesen Faktor mit der chemisch-petrographischen Beschaffenheit des vom Wasser durchflossenen geologischen Körpers bzw. mit der Abhängigkeit des Wasserchemismus von ihm zu identifizieren.

Überprüft man diese Hypothese, dann zeigt sich, daß gerade die besonders gesteinsabhängigen Ionen Calcium, Magnesium, Chlorid, Bikarbonat und Sulfat mit den Ladungen von über 0,8, teilweise über 0,9, an den Faktor 1 gebunden sind (Tabelle 12 und 13). Von den hohen Ladungen des Calciums, des Hydrogenkarbonats und der Gesamtmineralisierung aus wäre zunächst auch ein Zusammenhang mit dem CO₂-Gehalt im Wasser oder auch in der Bodenluft denkbar, doch würde dann die enge Beziehung des Chlorids, Nitrats und Sulfats zum Faktor 1 sehr unverständlich sein. Auch die Überprüfung der niederen Ladungswerte bestärkt die erste Annahme. So hängt der Eisengehalt kaum von der Gesteinsbeschaffenheit, sondern in erster Linie von dem Reduktions-Oxydations-Zustand ab.

Für den Faktor 2 ergeben sich hohe negative Ladungen beim Natrium und Na/Cl-Verhältnis, mittlere negative Ladungen für das SiO₂ und ein relativ hoher positiver Wert beim K/Na-Verhältnis. Alle übrigen Größen, einschließlich dem Chlorid, verhalten sich relativ indifferent. Die hohen Werte bei den beiden Verhältniszahlen scheiden

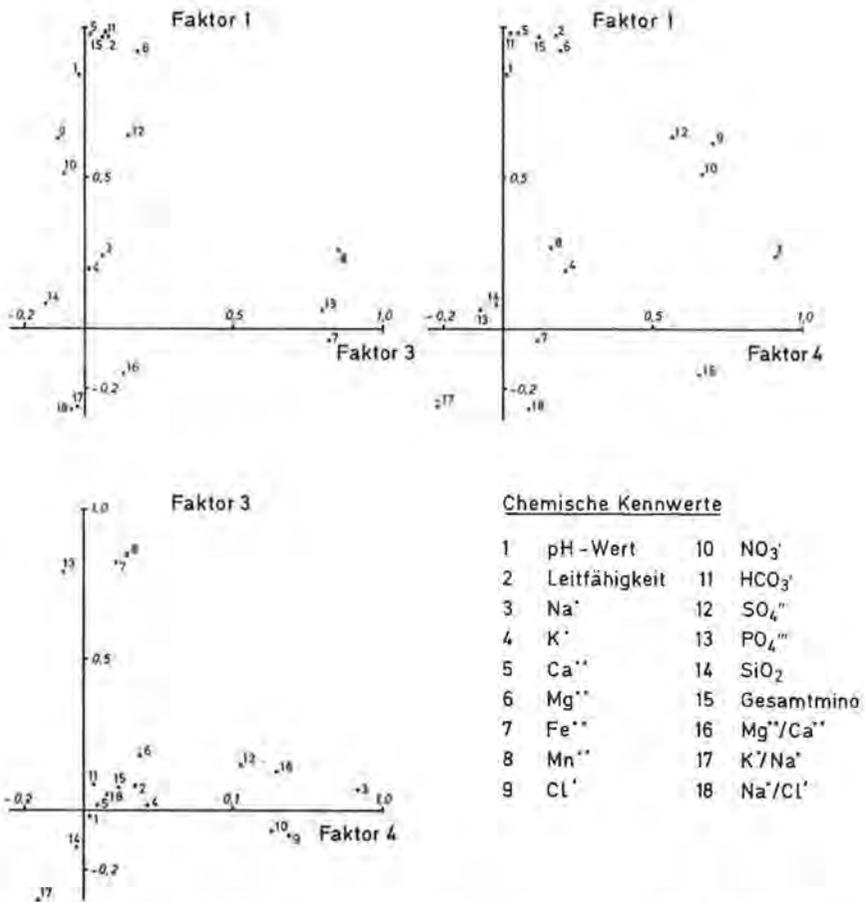


Fig. 28: Diagramme zur Faktorenanalyse der 18 chemischen Kennwerte, die zur Charakterisierung der Grundwässer herangezogen wurden.

für eine Interpretation des Faktors weitgehend aus, da sie definitionsbedingt direkt vom Natrium abhängen. Damit bleibt nur eine Variable, nämlich das Natrium, übrig, für das aber keine eindeutige Zuordnung zu einem Abhängigkeitsschema möglich ist. Eine Interpretation des Faktors kann daher nicht erfolgen. Auch die Rotation bringt keine Verbesserung der Aussagemöglichkeiten.

Eindeutiger sind die Verhältnisse beim Faktor 3, vor allem nach ausgeführter Rotation. Er ist durch hohe positive Ladungen für das Eisen, Mangan und Phosphat gekennzeichnet, während alle übrigen Ladungen um den Wert Null streuen (Fig. 28). Die direkte Abhängigkeit der genannten drei Ionen vom Reduktions-Oxydations-Zustand macht diesen verantwortlich für die Varianz des Faktors 3.

Der Faktor 4 ist durch hohe Ladungen bei den als Verschmutzungsindikatoren bekannten Ionen Natrium, Chlorid, Nitrat und Sulfat ausgezeichnet. Es dürfte daher sicherlich berechtigt sein, die durch den Faktor 4 bedingten Varianzen auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen.

Für den Faktor 5 sind hohe positive Ladungen für das Kalium und das K/Na-Verhältnis vorhanden. Hier gilt weitgehend dasselbe, was schon für den Faktor 2 gesagt wurde. Eine Interpretation der Varianz-Ursache ist daher nicht möglich.

Die faktorenanalytische Auswertung des Analysenmaterials des Untersuchungsgebietes zeigt die Möglichkeit, die Ursachen der unterschiedlichen chemischen Beschaffenheit der Wässer eines Einzugsgebietes nach dem Varianzanteil aufzuschlüsseln. Die Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung der beobachteten Wässer gehen zu 93% auf Faktoren zurück, die gleichzeitig mehrere Kennwerte beeinflussen. Davon werden 46% (= 42% der Gesamtvarianz) durch den unterschiedlichen Gesteinsaufbau verursacht. 12% (= 11% der Gesamtvarianz) gehen auf den schwankenden Reduktions-Oxydations-Zustand, 10% auf anthropogene Einflüsse sowie 14 bzw. 7% auf zwei Faktoren zurück, die besonders für den schwankenden Natrium- und Kieselsäure-Gehalt bzw. für das Kalium verantwortlich sind. Eine Interpretation der beiden zuletzt genannten Faktoren war nicht möglich.

7. Zusammenfassung

Das Einzugsgebiet der obersten Donau sowie der nördliche Hegau wurden hinsichtlich ihrer Grundwasserführung und der Beschaffenheit der Grundwässer untersucht. Ziel dieser Arbeiten war es, ein Gesamtbild der hydrogeologischen Verhältnisse der genannten Gebiete zu gewinnen und die hydrochemischen Gesetzmäßigkeiten durch moderne statistische Methoden zu erfassen.

Das Untersuchungsgebiet umfaßt Teile des vom Grundgebirge und Buntsandstein aufgebauten Schwarzwaldes sowie der von der mesozoischen Sedimentfolge geprägten Südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft. Im Südosten gehört noch der nördliche Hegau dazu, wo tertiäre und quartäre Ablagerungen weit verbreitet sind. Die Entstehung und Ausbildung der Schichtabfolge sowie ihre Lagerung werden beschrieben und die landschaftliche Entwicklung unter besonderer Berücksichtigung des danubischen Entwässerungssystems dargestellt. Die wichtigsten hydrographischen Daten des Arbeitsgebietes ergänzen diese Übersicht.

Die hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich der einzelnen, am Aufbau des Untersuchungsgebietes beteiligten Gesteine lassen sich wie folgt charakterisieren:

Die Wasserführung des Grundgebirges ist fast ausschließlich an die oberflächliche Auflockerungszone gebunden. Infolge der sich rasch nach der Tiefe schließenden Spalten und Klüfte spielt das Kluftwasser nur eine untergeordnete Rolle.

Die Buntsandsteinfolge ist in einzelne Grundwasserstockwerke zu gliedern. Einen wichtigen Grundwasserträger bilden die konglomeratischen Sandsteine an der Basis. Ihre zugehörige Sohlschicht ist die permisch-untertriadische Auflagerungsfläche, die einen ergiebigen Quellhorizont darstellt.

Im Bereich des Muschelkalkes sind vor allem die klüftigen und verkarsteten Kalke des mo für die Wasseraufnahme und -speicherung geeignet. Große Karstquellen treten im Raum von Donaueschingen an der Grenze zu den überlagernden Keuperschichten zutage. Ihr Zusammenhang mit dem westlich von Hüfingen versickernden Bregwasser konnte erstmalig durch einen Markierungsversuch nachgewiesen werden.

In ihren hydrogeologischen Eigenschaften gleichen sich Keuper, Lias und Dogger weitgehend. Infolge der überwiegend tonigen bis mergeligen Gesteine sind meist nur die geringmächtigen, sandigen und kalkigen Einschaltungen wasserführend. Das von diesen Schichten aufgebaute Gebiet ist arm an Grundwasser und daher ungeeignet für die Erschließung größerer Wassermengen.

Die karbonatische Gesteinsfolge des Oberen Jura bildet einen einheitlichen, in der Vertikalen weitgehend ungegliederten Karstkörper. Vorfluter für die der Schichtneigung folgenden unterirdischen Entwässerung ist in erster Linie die Donau mit ihren tiefeingeschnittenen Zubringern. Eine Ausnahme bildet der Karstbereich südlich der Donau zwischen dem Neuhöwen und der Linie Buchheim—Schwandorf im Osten. Dieser ist vollkommen auf das tiefere rheinische Vorflutniveau im Hegau eingestellt. Von der rückschreitenden, unterirdischen Erosion sind heute bereits Teile des Donautales betroffen, so daß es zu den bis zur Vollversickerung führenden Wasserverlusten an der Donau kommt. Die Entwässerung dieses Karstkörpers erfolgt weitgehend über die Aachquelle im Hegau, doch tritt ein nicht unerheblicher Teil direkt in die quartären Kiese des Hegaubeckens über.

Die tertiären Gesteine besitzen infolge ihrer vorwiegend mergeligen bis tonigen Ausbildung nur eine geringe Wasserdurchlässigkeit. Dagegen bilden die quartären Kiese und Sande im Bereich des Hegaus und in einzelnen Abschnitten des Donautales einen ergiebigen Grundwasserträger.

Die chemische Beschaffenheit der Grundwässer der verschiedenen Gesteins- bzw. Schichtfolgen werden beschrieben und die aus den zahlreichen Einzelbeobachtungen errechneten Mittelwerte und Standardabweichungen zu ihrer Charakterisierung angeführt. Unter Berücksichtigung der Ionenverteilung und der Mineralisierung lassen

sich in Abhängigkeit von der den Wasserchemismus bestimmenden chemisch-petrographischen Zusammensetzung des geologischen Körpers folgende Typen unterscheiden.

Grundgebirgswässer: sehr weich; erdalkalisch, überwiegend hydrogenkarbonatisch mit höherem Alkaligehalt;

Buntsandsteinwässer: sehr weich bis weich; erdalkalisch, hydrogenkarbonatisch-sulfatisch;

Karbonatgesteinswässer: ziemlich hart; erdalkalisch, überwiegend hydrogenkarbonatisch;

Gipswässer: sehr hart; erdalkalisch, überwiegend sulfatisch.

Zur Kennzeichnung der regionalen Veränderung der hydrochemischen Kennwerte wurden mittels einer elektronischen Rechenanlage mit angeschlossenem, automatischem Zeichengerät Isolinienkarten für die verschiedenen Inhaltsstoffe erstellt. Mit Erfolg konnte die Clusteranalyse zur Typisierung und Abgrenzung der Grundwässer herangezogen werden.

Die faktorenanalytische Auswertung der hydrochemischen Daten erlaubt eine Aufschlüsselung der beobachteten Unterschiede nach den die Varianz verursachenden Faktoren. Unter gewissen Vorbehalten läßt sich die unterschiedliche chemische Beschaffenheit (Gesamtvarianz) der Grundwässer des Untersuchungsgebietes zu 42% durch die voneinander abweichende chemische Zusammensetzung der zugehörigen Gesteinskörper erklären; 11% gehen auf den wechselnden Reduktions-Oxydations-Zustand und 9% auf anthropogene Einflüsse (Verschmutzung) zurück. Zwei weitere extrahierende Faktoren mit einem Varianzanteil von zusammen 19% konnten nicht interpretiert werden.

Literatur

Schriftenverzeichnis:

- ANDRES, G. & D. PFEIFFER: Erläuterungen zu Blatt Augsburg. — Hydrogeologische Übersichtskarte 1 : 500.000, 64 S., Remagen 1955.
- BACKHAUS, D. & U. SANDER: Zur Chemie der Donauquellflüsse Breg und Brigach und des obersten Donauabschnittes bis zur Versickerung bei Immendingen. — Arch. Hydrobiol. Suppl. 30 (Donauforschung II), 3, S. 228 bis 305, Stuttgart 1967.
- BARTZ, J.: Die Entwicklung des Flußnetzes in Südwestdeutschland. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 4, S. 127—135, Freiburg i. Br. 1961.
- BATSCHKE, H., F. BAUER, H. BEHRENS, K. BUCHTELA, H. J. DOMBROWSKI, R. GEISLER, M. A. GEYH, H. HÖTZL, F. HRIBAR, W. KÄSS, J. MAIRHOFER, V. MAURIN, H. MOSER, F. NEUMAIER, J. SCHMITZ, W. A. SCHNITZER, A. SCHREINER, H. VOGG & J. ZÖTL: Kombinierte Karstwasseruntersuchungen im Gebiet der Donauversickerung (Baden-Württemberg) in den Jahren 1967—1969. — Steir. Beitr. Hydrogeologie, 22, S. 5—165, Graz 1970.
- BATSCHKE, H., H. MOSER & W. STICHLER: Messung des Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehaltes in Karstwässern. — Geol. Jb., C 2, S. 275—288, Hannover 1972.
- BAUER, F.: Erfahrungen beim Uraninnachweis mit Aktivkohle. — Steir. Beitr. Hydrogeologie, 18/19, S. 169—178, Graz 1967.

- BERZ, K. C.: Die Grundwasserverhältnisse im Versickerungsgebiet der oberen Donau; ein Beitrag zum Problem der oberen Donau; ein Beitrag zum Problem der Karsthydrographie. — Mitt. geol. Abt. württ. statist. Landesamt, **11**, 82 S., Stuttgart 1928.
- BRAUN, K., L. ERB & K. SAUER: Die öffentliche Wasserversorgung in Südbaden. — Das Gas- und Wasserfach, **94**, Heft 10, S. 281—287, München 1953.
- BREUNINGER, F. W.: Fons Danubii primus et naturalis oder die Urquelle des weltberühmten Donaustromes. — 388 S., Tübingen 1719.
- CARLÉ, W.: Die Hegau-Heldburg-Zone, ein rheinisch streichendes Lineament in Süddeutschland. — Jh. d. geol. Abt. des württ. statist. Landesamtes, Jahrg. **2**, S. 14—26, Stuttgart 1952.
- CARLÉ, W.: Bau und Entwicklung der Südwestdeutschen Großscholle. — Beih. Geol. Jb., **16**, 272 S., Hannover 1955.
- DEECKE, W.: Geologie von Baden. — 1 u. 3, 782 S. und 629 S., Berlin (Borntraeger) 1916/18.
- DEECKE, W.: Denkschrift der Badischen Geologischen Landesanstalt Freiburg i. Br. über die geologischen Verhältnisse der Donauversickerung zwischen Immendingen und Fridingen. — Als Manuskript gedruckt, 31 S., Freiburg i. Br. 1924.
- Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. — 3. Auflage (Ringordner), Weinheim 1960—1968.
- Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Sonderheft Land Baden-Württemberg, Abflußjahr 1966, Stuttgart 1969.
- Deutsches Meteorologisches Jahrbuch, Bundesrepublik, 1965, Offenbach a. M. 1968.
- EINSELE, G.: Die Grundwasserführung kleiner lehmig-toniger Talfüllungen im Albvorland. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **7**, S. 633 bis 650, Freiburg i. Br. 1965.
- EISSELE, K.: Zur Hydrogeologie der Buntsandstein-Tiefenwässer am Schwarzwald-Ostrand. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **9**, S. 69—80, Freiburg i. Br. 1967.
- ENDRISS, K.: Die Rheinische Donau. — Naturwiss. Wochenschrift, **23**, 7, S. 97 bis 109, Jena 1908.
- ERB, L.: Erläuterungen zu Blatt Hilzingen. — Geol. Spezialkarte von Baden, 115 S., Freiburg i. Br. 1931.
- ERB, L.: Die Flußgeschichte der Radolfzeller Aach. — Mitteilungsbl. bad. geol. Landesanstalt, 1949, S. 56—59, Freiburg i. Br. 1950.
- ERB, L.: Über den Mechanismus der Donauversinkung und der Aachquelle. — Mitt. bad. Landesver. Naturkde. u. Naturschutz, N. F. **5**, S. 267—280, Freiburg i. Br. 1952.
- FAISI, S.: Die Eisen- und Manganerzgänge von Eisenbach (südöstlicher Schwarzwald) und ihre tektonische Stellung. — Neues Jb. Mineral. Abh., **83**, S. 53—150, Stuttgart 1951.
- FAST, H. & K. SAUER: Die chemische Zusammensetzung südbadischer Grundwässer, Herkunftsfragen und Versuch einer Typologie. — Vom Wasser, **25**, S. 28—81, Weinheim 1958.
- FINK, W.: Die Paleogeographie der Donau. — Limnologie d. Don., Liefg. **2**, S. 1—50, Stuttgart 1966.
- FRANK, M.: Der Wasserschatz im Gesteinskörper Württembergs. — 252 S., Stuttgart (Schweizerbart) 1951.
- GERB, L.: „Reduzierte“ Wässer. Beitrag zu einer Typologie bayerischer Gewässer. — Das Gas- und Wasserfach, **94**, S. 87—92 u. 157—161, München 1953.
- GERB, L.: Grundwassertypen. — Vom Wasser, **25**, S. 16—47, Weinheim 1958.

- GEYER, O. F. & M. P. GWINNER: Der Schwäbische Jura. — Samml. geol. Führer, 40, Berlin (Borntraeger) 1962.
- GEYER, O. F. & M. P. GWINNER: Einführung in die Geologie von Baden-Württemberg. — 2. Aufl., 228 S., Stuttgart (Schweizerbart) 1968.
- GRAHMANN, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. — Forsch. dtische. Landeskde., 104, 198 S., Remagen 1958.
- GWINNER, M. P.: Über die Zertalung der Buntsandsteinschichtstufe im Schwarzwald. — Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., N. F. 47, S. 97—110, Stuttgart 1965.
- HAFNER, G.: Die Geologie des Blattes Nendingen (Nr. 7919) 1 : 25.000 (Schwäbische Alb). — Arb. Geol. Paläontol. Inst. Univ. Stuttgart (TH), N. F. 58, Stuttgart 1969.
- HAHN, W.: Erläuterungen zu Blatt Leibertingen (Nr. 7920). — Geol. Karte Baden-Württ. 1 : 25.000, 106 S., Stuttgart 1968.
- HARMAN, H. H.: Modern factor analysis. — 520 S., Chicago (University Press) 1960.
- HASEMANN, W. & D. PFEIFFER: Erläuterungen zu Blatt Freiburg i. Br. — Hydrogeologische Übersichtskarte 1 : 500.000, 64 S., Remagen 1953.
- HEM, J. D.: Study and interpretation of chemical characteristics of natural water. — Geological Survey Water Supply Paper 1473, 269 S., Washington 1959.
- HÖLL, K.: Untersuchung, Beurteilung und Aufbereitung von Wasser. — Auf. 3, 235 S., Berlin (Walter de Gruyter) 1960.
- HÖTZL, H.: Zur Hydrogeologie des Einzugsgebietes der Donau oberhalb von Sigmaringen. — Unveröffentl. Habilitationsschrift der Fakultät für Bio- und Geowissenschaften an der Universität (TH) Karlsruhe, 293 S., Karlsruhe 1971.
- HÖTZL, H. & W. HUBER: Über die Hydrogeologie und wasserwirtschaftliche Nutzung der Aachquelle (Baden-Württemberg, BRD). — Geol. Jb., C 2, S. 359—382, Hannover 1972.
- HÖTZL, H. & W. KÄSS: Weitere Untersuchungen im Raum Donauversickerung-Aachquelle (Baden-Württemberg). — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 25, S. 103—116, Graz 1973.
- ILLIES, J. H.: Bauplan und Baugeschichte des Oberrheingrabens. Ein Beitrag zum „Upper Mantle Project“. — Oberrh. geol. Abh., 14, S. 1—54, Karlsruhe 1965.
- ILLIES, J. H.: The Rhine Graben Rift System, Plate Tectonics and Transform Faulting. — Geophysical Surveys, 1, S. 27—60, Dordrecht/Holland 1972.
- KÄSS, W.: Die unmittelbare Bestimmung von Uranin-Spuren bei Färbversuchen. — Steir. Beitr. Hydrogeologie, 15/16, S. 37—65, Graz 1964.
- KÄSS, W.: Zur Geochemie einiger neuerschlossener Buntsandstein-Mineralwässer am Schwarzwald-Ostrand. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 9, S. 81—104, Freiburg i. Br. 1967.
- KÄSS, W.: Schrifttum zur Versickerung der oberen Donau zwischen Immen dingen und Fridingen (Südwestdeutschland). — Steir. Beitr. Hydrogeologie, 21, S. 215—246, Graz 1969.
- KÄSS, W.: Die Versickerung der Oberen Donau, ihre Erforschung und die Versuche 1969. — Geol. Jb., C 2, S. 13—18, Hannover 1972.
- KAISER, H. F.: The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. — Psychometrica, 23, S. 187—200, 1958.
- KELLER, R.: Der mittlere Niederschlag in den Flußgebieten der Bundesrepublik Deutschland. — Forsch. dtische. Landeskunde, 103, 81 S., Remagen 1958.
- KNOP, A.: Über die hydrographischen Beziehungen zwischen der Donau und der Aachquelle im badischen Oberlande. — N. Jb. Min., Geologie und Petrographie, S. 350—363, Stuttgart 1878.

- LANGGUTH, R.: Die Grundwasserverhältnisse im Bereich des Velberter Sattels (Rheinisches Schiefergebirge). — 127 S. (der Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen), Düsseldorf 1966.
- LININGER, H.: Beziehungen zwischen Pliozän und Jurafaltung in der Ajoie. — Ecl. geol. Helv., 57, S. 75—90, Basel 1964.
- LININGER, H.: Das Plio-Altpleistozäne Flußnetz der Nordschweiz. — Regio Basiliensis, H. 7/2, S. 158—177, Basel 1966.
- MANZ, O.: Die Ur-Aare als Oberlauf und Gestalterin der pliozänen Oberen Donau. — Hohenzoll. Jh. 1 u. 2, S. 113—160 u. S. 187—227, Hechingen 1934 u. 1935.
- MATTHES, G.: Die Herkunft der Sulfat-Ionen im Grundwasser. — Abh. hess. Landesamt f. Bodenforschung, 35, 125 S., Wiesbaden 1961.
- MAURIN, V. & J. ZÖTL: Die Untersuchung der Zusammenhänge unterirdischer Wässer mit besonderer Berücksichtigung der Karstverhältnisse. — Steir. Beitr. Hydrogeologie, 1959, 184 S., Graz 1959.
- MCCAMMON R. B. & G. WENNINGER: The Dendrograph. — Computer Contribution, 48, S. 1—27, Lawrence 1970.
- MEHNERT, K. R.: Petrographie und Abfolge der Granitisation im Schwarzwald. — Neues Jb. Mineral. Abh., 85, S. 59—140, Stuttgart 1953.
- MEHNERT, K. R.: Petrographie und Abfolge der Granitisation im Schwarzwald II. — Jb. Mineral. Abh., 90, S. 39—90, Stuttgart 1957.
- METZ, R., G. REIN & H. SCHÜRENBERG: Erläuterungen zur geologisch-petrographischen Übersichtskarte des Schwarzwaldes 1 : 50.000. — 134 S., Lahr (Schauenburg) 1958.
- NÖRING, F.: Fragen der Grundwasserchemie in Beziehung zur Oberfläche und Untergrund. — Z. dtsh. geol. Ges., 102, S. 123—128, Hannover 1951.
- ORTLAM, D.: Paläoböden im höheren Buntsandstein des mittleren Schwarzwaldes. — Geol. Jb., 87, S. 61—88, Hannover 1969.
- PAUL, W.: Das Donaueschinger Ried und seine Bedeutung für die Gestaltungsgeschichte Südwestdeutschlands. — Mitteilungsbl. bad. geol. Landesanst. 1949, S. 59—65, Freiburg i. Br. 1950.
- PAUL, W.: Zur Morphogenese des Schwarzwaldes. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 1, S. 395—427, Freiburg i. Br. 1955.
- PAUL, W.: Zur Stratigraphie und Fazies des Oberen Muschelkalkes zwischen oberem Neckar und Hochrhein. — Schr. Landkr. Donaueschingen, 8, S. 9—20, Donaueschingen 1956.
- PENN, W.: HLUP.-Programm zur Berechnung und Zeichnung von Höhenlinien aus unregelmäßig verteilten Punkten einer Funktion zweier Veränderlicher. — Unveröff. Programmbeschr. des DRZ, Darmstadt 1970.
- SAUER, A.: Erläuterungen zu Blatt Dürrheim (Nr. 111). — Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, 39 S., Heidelberg 1901.
- SAUER, K.: Beiträge zur Hydrogeologie der näheren Umgebung von Freiburg. — Mitt. bad. Landesver. Naturkunde und Naturschutz, N. F. 9, S. 611—637, Freiburg i. Br. 1967.
- SCHALCH, F.: Erläuterungen zu Blatt Villingen (Nr. 110). — Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, 78 S., Heidelberg 1899.
- SCHALCH, F.: Erläuterungen zu Blatt Donaueschingen (Nr. 120). — Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, 35 S., Heidelberg 1903.
- SCHALCH, F.: Erläuterungen zu Blatt Geisingen (Nr. 121). — Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, 80 S., Heidelberg 1909.
- SCHMIDT, K.: Hydrologisches Problem und wasserwirtschaftliche Aufgabe „Donauversinkung“. — Die Wasserwirtschaft, 51, S. 268—272, Stuttgart 1961.
- SCHNELL, P. & F. GEBHARDT: Hauptachsen-Faktorenanalyse. — Unveröff. Programmbeschr. des DRZ, Darmstadt 1966.

- SCHREINER, A.: Über den Weißen Jura im Hegau. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 5, S. 243—277, Freiburg i. Br. 1961.
- SCHREINER, A.: Geologische Untersuchungen am Höwenegg/Hegau. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 6, S. 395—420, Freiburg i. Br. 1963.
- SCHREINER, A.: Die Juranagelfluh im Hegau. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 7, S. 303—354, Freiburg i. Br. 1965.
- SCHREINER, A.: Erläuterungen zu Blatt 8118 Engen. — Geol. Karte Baden-Württemberg 1 : 25.000, 190 S., Stuttgart 1966.
- SCHREINER, A.: Eiszeitliche Rinnen und Becken und deren Füllung im Hegau und westlichen Bodenseegebiet. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 10, S. 79—104, Freiburg i. Br. 1968.
- SCHREINER, A.: Erläuterungen zur geologischen Karte des Landkreises Konstanz mit Umgebung 1 : 50.000. — 286 S., Stuttgart 1970.
- SPITZ, W.: Gutachten zum Bosch-Entwurf und Endriss-Gutachten — Unveröff. Schreiben der Bad. Geol. Landesanstalt in Freiburg i. Br., Nr. 21298, 10. Oktober 1924.
- SPITZ, W.: Erläuterungen zu Blatt Möhringen (Nr. 122 = Tuttlingen). — Geologische Spezialkarte von Baden, 107 S., Freiburg i. Br. 1930.
- STEMMER, J.: Die Anzapfung der danubischen Eschach durch den Neckar. — Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., N. F. 43, S. 81—92, Stuttgart 1961.
- STRÄSSER, M.: Studien zum Grundwassermechanismus des nordwestlichen Bodenseeraumes. — Freiburger Geogr. Hefte, H. 2, 82 S., Freiburg i. Br. 1966.
- STRAYLE, G.: Karsthydrologische Untersuchungen auf der Ebinger Alb (Schwäbischer Jura). — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 12, S. 109—206, Freiburg i. Br. 1970.
- ÜBERLA, K.: Faktorenanalyse. — 399 S., Berlin (Springer) 1968.
- VILLINGER, E.: Karsthydrologische Untersuchungen auf der Reutlinger Alb (Schwäbischer Jura). — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 11, S. 201—277, Freiburg i. Br. 1969.
- VILLINGER, E.: Seichter Karst und Tiefer Karst in der Schwäbischen Alb. — Geol. Jb., C 2, S. 153—188, Hannover 1972.
- VOLLRATH, A.: Zur Stratigraphie des Trochitenkalkes in Baden-Württemberg. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 1, S. 109—189, Freiburg i. Br. 1955.
- WAGNER, G.: Junge Krustenbewegungen im Landschaftsbild Südwestdeutschlands. — Erdgesch. Landeskd. Abh. Schwaben und Franken, 10, 300 S., Öhringen 1929.
- WAGNER, G.: Zur Flußgeschichte von oberer Donau und oberem Neckar. — Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., N. F. 43, S. 93—98, Stuttgart 1961.
- WAGNER, G.: Danubische und rheinische Abtragung im Neckar- und Taubertal. — Ber. deutsch. Landeskd., 31, S. 1—11, 1963.
- WECHMANN, A.: Hydrologie. — 534 S., München (Oldenbourg) 1964.
- WEIDENBACH, F.: Über einige Wasserbohrungen im Jura. — Jber. und Mitt. oberrh. geol. Ver., N. F. 36, S. 54—73, Stuttgart 1954.
- WUNDT, W.: Grundwasservorkommen im Gebiet der oberen Donau. — Das Gas- und Wasserfach, 92, Heft 12, S. 141—146, München 1951.
- WUNDT, W.: Die mittleren Abflußhöhen und Abflußpenden des Winters, des Sommers und des Jahres in der Bundesrepublik Deutschland. — Forsch. dtsh. Landeskd., 105, 20 S., Remagen 1958.
- ZURMÜHL, R.: Matrizen und ihre technische Anwendung. — 430 S., Berlin (Springer) 1964.

Topographische und geologische Karten:

Topographische Karte 1 : 25.000 (Herausgeb.: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart), Blatt 7814 bis 7820, 7914 bis 7920, 8014 bis 8020, 8015 bis 8020, 8116 bis 8120 sowie 8218 und 8219.

Topographische Karte 1 : 100.000 (Herausgeb.: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart), Blatt C 7918 und vorläufige Ausgabe des Blattes C 8318.

Karte des Deutschen Reiches 1 : 100.000 (Ausgaben des Landesvermessungsamtes Baden- Württemberg), Blatt 631, 632, 644 und 645.

Geologische Karten 1 : 25.000:

Blatt 7815 Triberg. Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, A. SAUER 1898.

Blatt 7816 Königfeld (Niedereschach). Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, F. SCHALCH 1896.

Blatt 7817 Rottweil. Geologische Spezialkarte von Württemberg, M. SCHMIDT 1909.

Blatt 7818 Wehingen. Geologische Spezialkarte von Württemberg, K. C. BERZ 1932.

Blatt 7915 Furtwangen. Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, F. SCHALCH 1901.

Blatt 7916 Villingen. Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, F. SCHALCH 1898.

Blatt 7917 Schwenningen. Geologische Spezialkarte von Württemberg, M. SCHMIDT 1912.

Blatt 7918 Spaichingen. Geologische Spezialkarte von Württemberg, K. C. BERZ & A. ROLL 1937.

Blatt 7920 Leibertingen. Geologische Karte von Baden-Württemberg, W. HAHN 1969.

Blatt 8015 Neustadt. Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, F. SCHALCH 1900.

Blatt 8016 Donaueschingen. Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, F. SCHALCH 1902.

Blatt 8017 Geisingen. Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, F. SCHALCH 1907.

Blatt 8018 Tuttlingen (= Möhringen). Geologische Spezialkarte von Baden, W. SPITZ 1926.

Blatt 8116 Bonndorf. Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, F. SCHALCH 1904.

Blatt 8117 Blumberg. Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden, F. SCHALCH 1906.

Blatt 8118 Engen. Geologische Karte von Baden-Württemberg, A. SCHREINER 1966.

Blatt 8120 Stockach. Geologische Karte von Baden-Württemberg, L. ERB, H. A. HAUS & E. RUTTE 1962.

Geologische Karte 1 : 50.000, Geologische Karte des Landkreises Konstanz mit Umgebung, L. ERB 1967.

Geologische Karte 1 : 100.000, Geologische Übersichtskarte Kreis Balingen, K. SCHADEL 1954.

Geologische Karte 1 : 200.000, Geologische Übersichtskarte von Baden-Württemberg, Blatt Südwest und Blatt Südost (Herausgeb.: Geologisches Landesamt, Baden-Württemberg), 3. Auflage 1962.

Hydrogeologische Übersichtskarte 1 : 500.000 (Herausgeb.: Bundesministerium für Wirtschaft).

Blatt Augsburg: G. ANDRES, D. PFEIFFER & K. SCHADEL 1955,

Blatt Freiburg: W. HASEMANN & D. PFEIFFER 1952.

Summary

The drainage area of the uppermost Danube and the area of the northern Hegau (Southwest Germany) was investigated with regard to the ground-waterbearing and the hydrogeochemistry. The aim was to obtain a general view of the hydrogeologic conditions, to solve some specially karsthydrologic problems and to grasp the hydrochemical regularity by statistical methods.

The area of discussion is built up from west to east by the granitic and gneissic basement for the Black Forest, by the succession of the triassic and jurassic sediments of the Southwest German cuesta landscape and by the tertiary and quaternary sediments in the northern Hegau. The sequence of bedding and its lithological character are described as well as the development of the landscape with the reduction of the Danube drainage system in favour of the Rhenish catchment.

The hydrogeologic conditions of the different rock unities are characterised as follows:

The water-bearing of the basement is essentially bound to the layer of weather-worn material, which is of varying, most small thickness and which is separated by the morphology and by unweathered rocks in isolated catchments with narrow spatial limitation. Because the fissures are rapidly closing to the depth, the joint water is not of great importance.

The Bunter is divided in several aquifers overlying each other. The most important is the basal conglomeratic sandstone complex. Its lower confining bed, the permiantriassic peneplain, is an abounding spring horizon. In the area of the Muschelkalk the jointing and karstic limestones of the upper part are predestinated for water-bearing and -storage. Great karst springs occur on the border to the overlying Keuper beds in the east. For the springs near the region of Donaueschingen the direct subsurface connection with the water-losses of the Breg River west from Hüfingen could be proofed first by a dyeing experiment.

The hydrogeologic situation in the Keuper and in the Lower- and Middle-Jurassic is very similar. According to the dominance of shales and marlstones the groundwater bearing is restricted to some thin sandy and calcareous interbeddings. The area, which is built up by these formations, is poor of groundwater and there are no possibilities for a great output of water.

The limestones of the Upper-Jurassic form a unique, in the vertical largely undivided karst-body, though marlstones are interbedded. The receiving water course for the subsurface water flow is primarily the Danube with its deepengraved affluents. An exception makes a part of the karst area in the south of the Danube, which is directed to the deeper base level of the Rhenish drainage system in the Hegau. The back stepping subterranean erosion in this karst body has reached the Danube valley, so that the river losses during low flow the whole water. Most of it reappears in the Aach spring, which is with an average yield of 8,8 cbm/s the largest spring of Germany. A smaller part of this karst water is supplying the groundwater in the quaternary gravels of the Hegau, which are from a great yield.

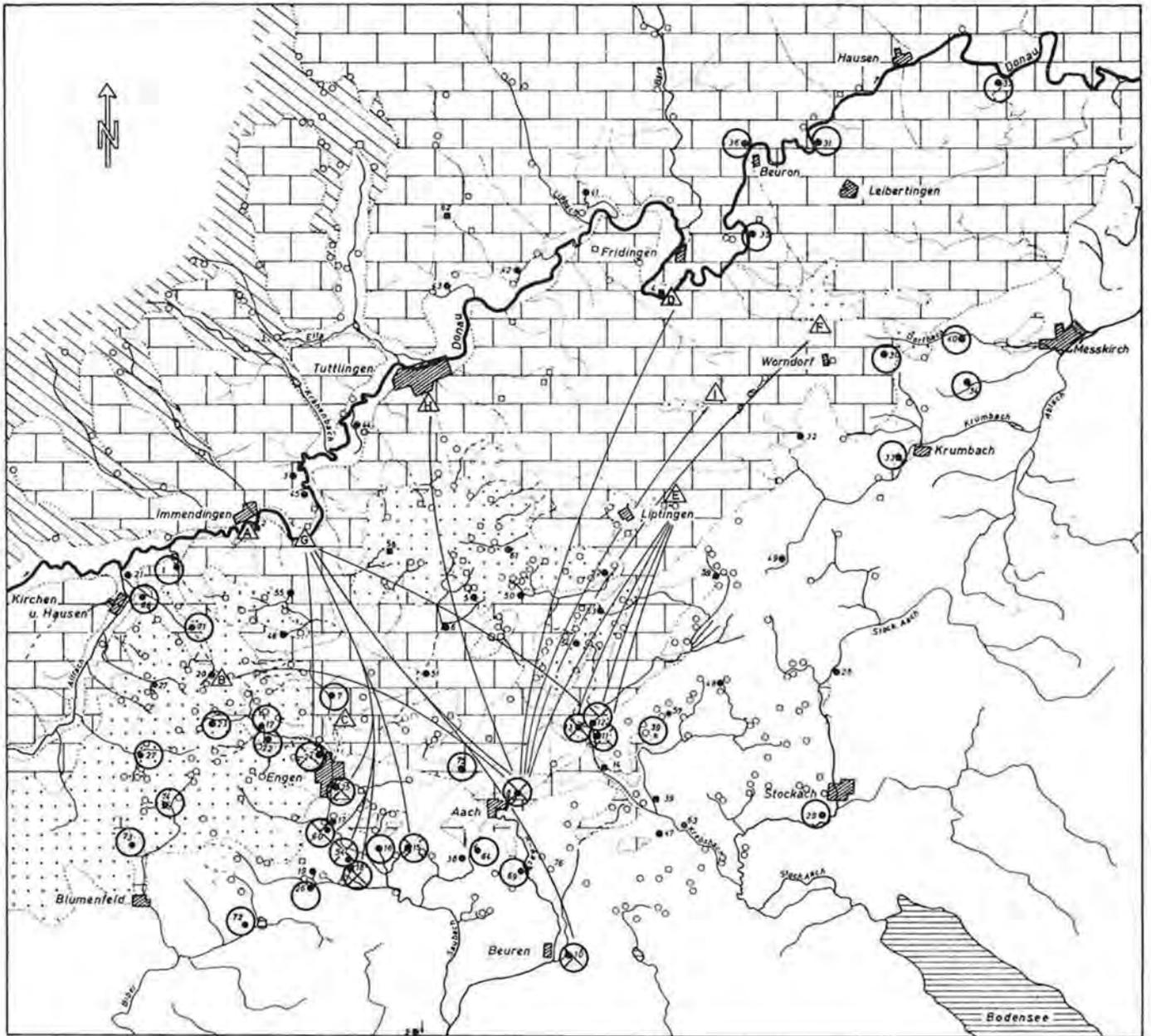
The chemical characteristics of the groundwater of the different rock series are described. With regard to the distribution and content of the ions as well as the influence of the chemical and mineralogical composition of the aquifers there can be distinguished four types: Basement water, Bunter water, water from carbonatic rocks and water from gypsum.

For the classification and typifying of the groundwater on the base of chemical data there were used also successfully multivariate statistical methods, as cluster- and factor-analysis. Interpreting the mathematical factors as real equivalences then the influence of the chemical and mineralogical composition of the rocks on the chemical properties of the groundwater can be

quantitatively estimated. In the area of discussion 42% of the total variance in the chemical data of the groundwater has its origin in the different composition of the rocks; 9% are owing to artificial effects as pollution and 11% are caused by the different oxidation-reduction potential. Two more factors could'nt be interpreted.

Anschrift des Verfassers: Univ.-Doz. Dr. H. HörzL, Geologisches Institut, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-75 Karlsruhe.

Die Ergebnisse des kombinierten Markierungsversuches vom August 1969
(nach H. BATSCHKE et al., 1970).



- a) Donautal: quartäre Schotter u. Hangschutt
- b) im Süden: Quartär u. Tertiär
- tertiäre Überlagerung der Malmkalke (insbes. Juranagelfluh)
- Malmkalke
- Dogger

- Flußlauf
 - temporäres Gerinne
 - Trockental
 - Quelle
 - Brunnen
- m. Best. d. physik. u.
chem. Kennwerte

Beobachtungstellen mit monatlicher
Beprobung: Aug. 68 - Aug. 69

- Quelle u. Brunnen
- offenes Gerinne

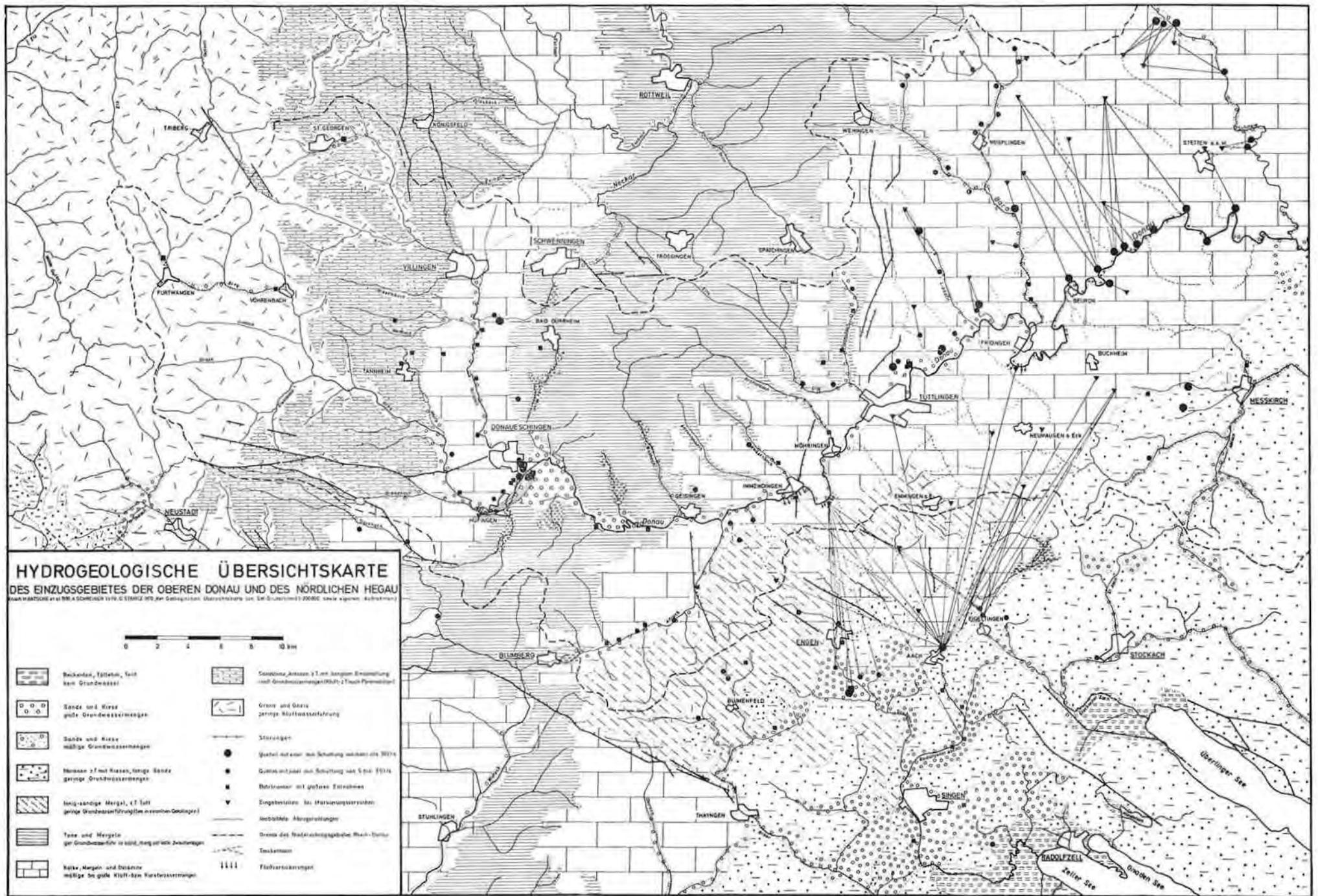
0 1 2 3 4 5 km

Eingabestellen:

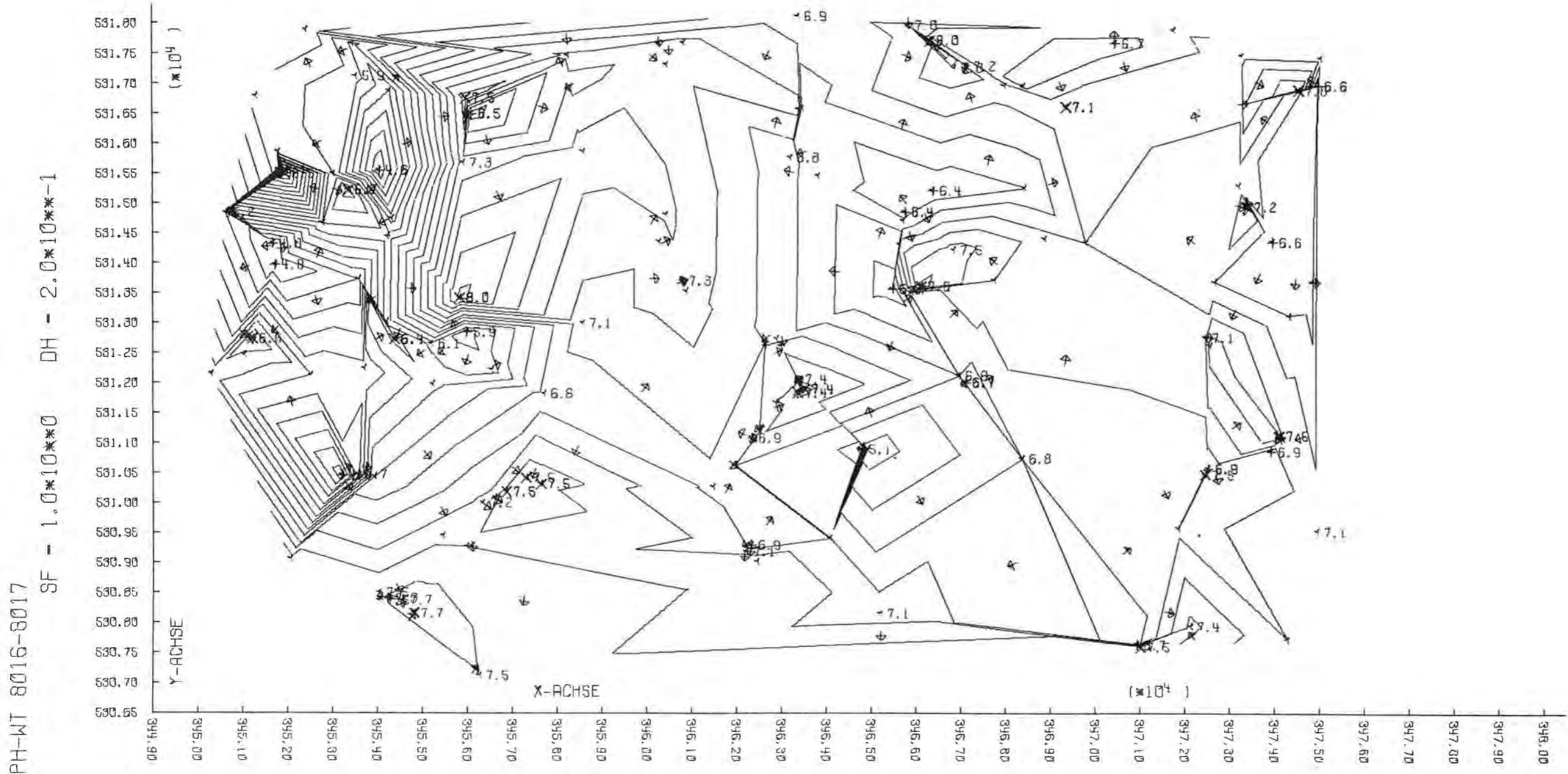
- | | |
|-------------------------|--|
| A { Dipenden
KCl | E { Detergentien
Isobornylacetat |
| B Sulforhodamin G extra | F Uranin |
| C Ammonbromid | G { Serratia marcescens
braune Sporen |
| D { Lantan
Chrom | H NaCl |
| | I grüne Sporen |

Beobachtungsstellen für Markierungsstoffe:

- Beprobung negativ
- Beprobung positiv
- beob. Verbindungen



Tafel III: zu H. Hörzl, 1973. Die Verteilung des pH-Wertes im Bereich der Meßschblätter Donaueschingen (8016) und Geisingen (8017). Der Abstand der Isolinien beträgt jeweils 0,2 pH-Einheiten. Die Koordinatenabstände mal 10^4 ergeben die Rechts- bzw. Hochwerte, wobei die x-Achse zur y-Achse im Verhältnis 1:1,13 verzerrt ist. Weitere Erläuterungen im Text.



Tafel IV: zu H. Hörzl. 1973, Die Verteilung des Calciums (in $\mu\text{val/l}$) im Bereich der Meßtischblätter Donaueschingen (8016) und Geisingen (8017). Der Abstand der Isolines beträgt jeweils 500 $\mu\text{val/l}$. Die Koordinatenabstände mal 10^4 ergeben die Rechts- bzw. Hochwerte, wobei die x-Achse zur y-Achse im Verhältnis 1:1,3 verzerrt ist. Weitere Erläuterungen im Text.

