BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE
ABHANDLUNGEN · NEUE FOLGE, HEFT 146

JAN-PETER WROBEL

Hydrogeologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Loisach zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe/Obb.

Beitrag zur Hydrologischen Dekade der UNESCO

Mit 38 Abbildungen, 23 Tabellen und 3 Beilagen

Vorgelegt von Herrn Richard Dehm
am 7. November 1969

MÜNCHEN 1970

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
IN KOMMISSION BEI DER C.H.BECK'SCHEN VERLAGSBUCHHANDLUNG MÜNCHEN

Druck: Buchdruckerei Gebr. Parcus, München
Printed in Germany

Inhalt

Vorwort 5

1. Einleitung 7

2. Geologischer Überblick und Stratigraphie 9
2.1. Geologischer Überblick 9
2.2. Stratigraphie 9
2.2.1. Trias 9
2.2.1.1. Karnische Stufe 9
2.2.1.2. Norische Stufe 10
2.2.1.3. Rätische Stufe 10
2.2.2. Jura 10
2.2.3. Quartär 10
2.2.3.1. Pleistozän 10
2.2.3.2. Holozän 12

3. Tektonik und Hydrogeologie östlich und westlich der Loisach 13
3.1. Hydrogeologische Untersuchungen der östlichen Talflanke des Loisachtales 13
3.2. Markierungsversuch im Krottenkopfgebiet 13
3.2.1. Schlußfolgerungen zum Markierungsversuch 20
3.3. Hydrogeologische Untersuchung der westlichen Talflanke des Loisachtales 20
3.4. Quellbeobachtungen in den Gebirgsstöcken 21

4. Hydrogeologie des Tales von Garmisch-Partenkirchen bis Eschenlohe . . . 26
4.1. Talgeschichte und Aufbau der Talfüllung 26
4.2. Grundwasserverhältnisse 32
4.2.1. Das erste Grundwasserstockwerk 32
4.2.2. Das zweite Grundwasserstockwerk 34
4.2.3. Ganglinienvergleiche 36
4.2.4. Pumpversuche 40
4.2.4.1. Auswirkungen der Pumpversuche in den beiden Grundwasserstockwerken . 40
4.2.4.2. Auswirkungen des Großpumpversuches 1966 an Vorflutern 42
4.2.4.3. Durchlässigkeitsbeiwerte 42
4.3. Chemische Wasseruntersuchungen 42
4.3.1. Chemische Wasseruntersuchungen an Grundwassermeßstellen 42
4.3.2. Chemische Wasseruntersuchungen an Quellen und Vorflutern 46
4.3.3. Der Chemismus der Wässer der Loisach und der Bäche im Talbereich . . . 49
4.4. Temperaturmessungen an Grundwassermeßstellen und Brunnen 50

5. Wasserhaushalt 54
5.1. Abgrenzung des Einzugsgebietes der Loisach für den Pegel Eschenlohe . . 54
5.2. Abflußbestimmungen 55
5.3. Abflußspendenvergleiche 68
5.4. Herkunft des Grundwassers 71

6. Hydrologische Zusammenhänge im Grundwasser der Talfüllung 75

7. Zusammenfassung 81

Anhang 84

Literaturverzeichnis 85

Vorwort

Die hydrogeologischen Untersuchungen im Einzugsgebiet der Loisach zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe entstanden auf Anregung von Herrn Prof. Dr. F. Neumaier, der diese Arbeit stets unterstützte, wofür ich ihm herzlich danken möchte.

Mein Dank gebührt auch Herrn Regierungsbaudirektor J. Hofbauer für die gute Zusammenarbeit und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung.

Herr Präsident J. Völk von der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München, gestattete mir die Benützung der Einrichtungen der Landesstelle für Gewässerkunde und die Einsichtnahme von Unterlagen.

Die Wasserwerke der Landeshauptstadt München, hier vor allem Herr Stadtbaudirektor A. Lohr und Frau Oberchemierätin Dr. I. Alexander, unterstützten mich dankenswerterweise stets freundlich und hilfsbereit bei der Beschaffung von Unterlagen.

Bei einigen Geländeuntersuchungen leistete mir das Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung, München, wertvolle Hilfe.

Bei der Beschaffung von Unterlagen halfen mir Herr Regierungsbaudirektor Dr. F. Traub und das Bayer. Landesamt für Wasserversorgung und Gewässerschutz, München, Herr Oberregierungschemierat Dr. J. Müller von der Staatlich Chemischen Untersuchungsanstalt in München und der Werksleiter der Gemeindewerke Garmisch-Partenkirchen Ingenieur O. Neff. Allen Genannten gilt mein besonderer Dank.

Herrn Diplom-Geologen K. Cramer an der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München, danke ich für sein stetes Interesse am Fortgang der Arbeit.

Für ihre begeisterte Teilnahme an einem Markierungsversuch danke ich den Herren Diplom-Geologen Dr. H. Batsche, R. Apel, G. Meier und E. Schirm.

Ferner möchte ich all denen meinen Dank aussprechen, die im täglichen Umgang den Fortschritt meiner Arbeit in verschiedenster Weise förderten.

1. Einleitung

Das Ziel der Arbeit war die Erfassung der hydrogeologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Loisach zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe/Obb.

Die wesentlichen Untersuchungen wurden in dem genannten Gebiet durchgeführt. Jedoch war es in einigen Fällen notwendig, das gesamte Einzugsgebiet der Loisach für den Pegel Eschenlohe und benachbarte Bereiche heranzuziehen.

Das Einzugsgebiet für den Pegel Eschenlohe umfaßt etwa 500 km². Es gehört zum größten Teil zum Freistaat Bayern, nur ein kleiner Teil liegt auf österreichischem Gebiet. Für vergleichende Betrachtungen wurde das westlich angrenzende Einzugsgebiet der Ammer für den Pegel Oberammergau herangezogen.

Für meine Arbeit stand mir ein reiches Tatsachenmaterial der Wasserwerke der Landeshauptstadt München zur Verfügung, die seit 1954 im Loisachtal zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe/Obb. zahlreiche Aufschlußbohrungen abteufen ließen und seither ein umfangreiches Meßprogramm zur Erschließung eines Grundwasservorkommens im Loisachtal zwischen Farchant und Eschenlohe durchführen. Außerdem fanden einige Pumpversuche statt.

Im wesentlichen wurden neben diesen zahlreichen Daten und eigenen Beobachtungen Unterlagen der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München, des Bayerischen Landesamtes für Wasserversorgung und Gewässerschutz, München, des Wasserwirtschaftsamtes Weilheim und der Gemeindewerke Garmisch-Partenkirchen verwendet, um die geologischen, hydrogeologischen, chemischen und physikalischen Zusammenhänge in der Auffüllung des Loisachtales zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe zu erfassen.

Bei der Klärung der Verbindungen zwischen den angrenzenden, z. T. verkarsteten Gebirgsstöcken und dem Loisachtal wurde im Osten im wesentlichen auf die Arbeiten von J. Niedermayer (1936) und A. Malaschofsky (1940/41), im Westen auf die von C. W. Kockel, M. Richter, H. G. Steinmann (1931) zurückgegriffen.

Als geologische Kartenunterlagen dienten im engeren Untersuchungsgebiet die Kartierungen von J. Niedermayer (1936) und C. W. Kockel, M. Richter, H. G. Steinmann (1931). Für das weitere Einzugsgebiet mußte auf die kleinmaßstäbliche geologische Karte 1:500000 des Bayerischen Geologischen Landesamtes zurückgegriffen werden.

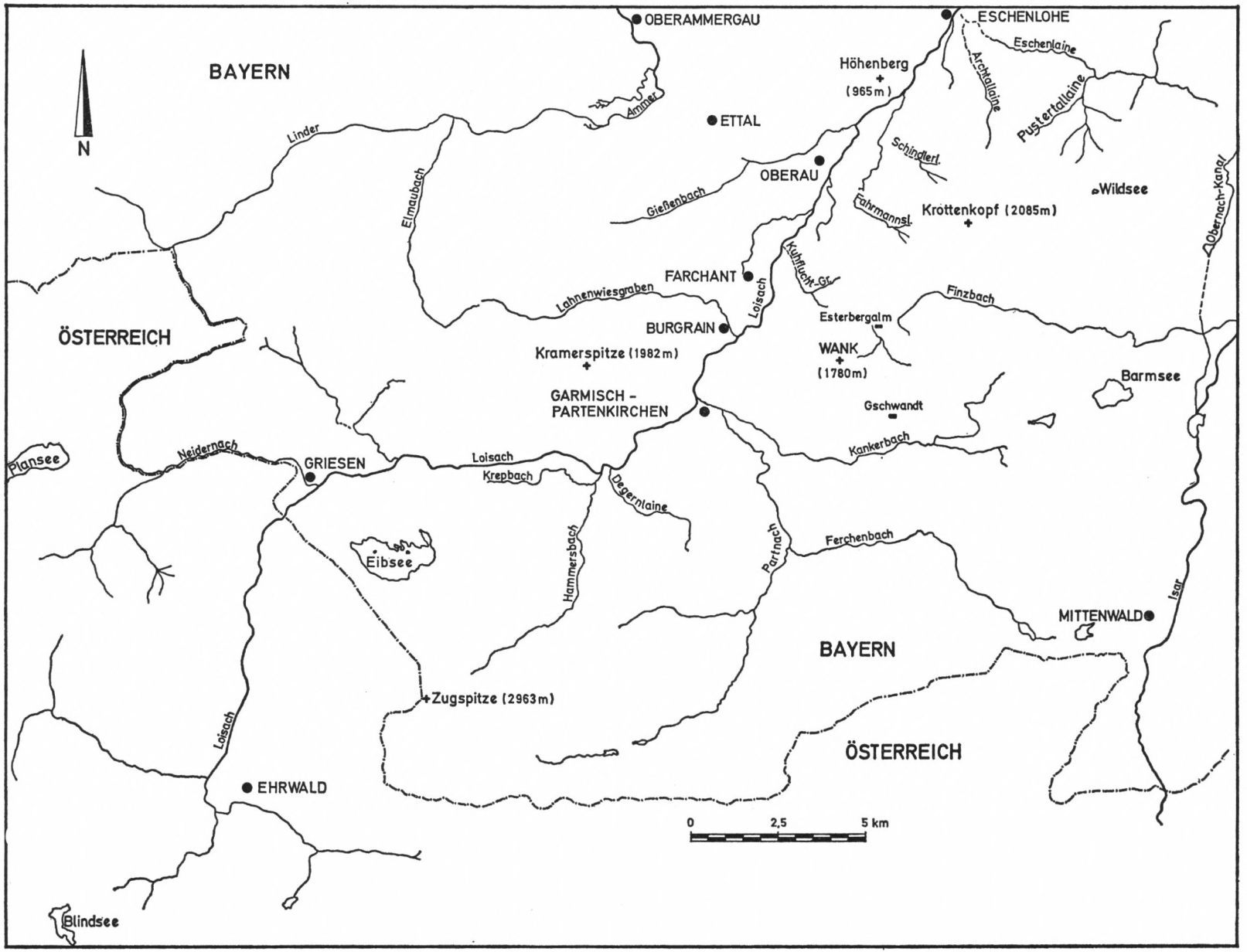


Abb. 1: Geographische Übersichtskarte für das Einzugsgebiet der oberen Loisach

2. Geologischer Überblick und Stratigraphie

2.1. Geologischer Überblick

Das Einzugsgebiet der Loisach für den Pegel Eschenlohe liegt in den nördlichen Kalkalpen. Die Loisach durchschneidet auf einem großen Teil ihres Verlaufes die im wesentlichen E-W streichenden Sättel und Mulden der nördlichen Kalkalpen in der nach ihr benannten, SSW-NNE verlaufenden Loisachrichtung, die tektonisch bedingt ist. Teilweise fließt sie parallel zu den Faltenachsen, z. B. zwischen Griesen und Garmisch-Partenkirchen.

Im engeren Untersuchungsgebiet zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe stellt das 1–2 km breite Loisachtal einen tektonisch angelegten, glazial übertieften Trog dar, der glazial und postglazial mit Moränen, Sanden, Seetonen und Schottern aufgefüllt wurde.

Die dem Tal angrenzenden Gebirgsstöcke bestehen im wesentlichen aus gefalteter alpiner Trias. In den Muldenkernen tritt vereinzelt Jura auf. Kreide und Tertiär sind im engeren Untersuchungsgebiet nicht aufgeschlossen. Jüngere Bildungen sind mit Ausnahme von Moränen, Moor und Schuttbildungen auf den Talbereich beschränkt.

2.2. Stratigraphie

2.2.1. Trias

2.2.1.1. Karnische Stufe, (Raibler-Sandsteine, -Mergel, -Dolomite, -Kalke und -Rauhwacken)

Als älteste, im engeren Untersuchungsgebiet aufgeschlossene Stufe, erscheint das Karn. Ältere Gesteine treten erst südlich von Garmisch-Partenkirchen zutage.

Das Karn ist mit Raibler-Sandsteinen, -Mergeln, -Dolomiten, -Kalken und -Rauhwacken vertreten. Im Kankerbachtal östlich Garmisch-Partenkirchen finden sich Raibler Schichten in allen ihren petrographischen Erscheinungsformen, im Gießenbachtal teilweise gipshaltige Dolomite. In einem Vorkommen nördlich von Oberau wurde zeitweise Gips abgebaut. Diese dem Oberauer Sattel angehörenden gipshaltigen Dolomite dürften sich unterirdisch durch das Loisachtal in Richtung Eschenlaine hinziehen.

Die Raibler Sandsteinserie besteht aus sandigen Schiefern, Mergeln und Sandsteinen. Die Serie ist wegen der mergeligen Beimengungen meist wasserundurchlässig. Lediglich die reinen Sandsteine sind als Grundwasserspeicher geeignet.

Die grauen bis braunen Raibler Kalke sind meist dickbankig und wenig geklüftet. Eine bedeutende Verkarstung ist nicht feststellbar. In den Kalken ist nur eine geringe Wasserführung in Klüften möglich.

Die Raibler Kalke werden von mürben Dolomiten überlagert, die in der Lage sind, größere Mengen Wasser schwammartig aufzunehmen.

In die Mürbdolomite sind stockartig Gipsvorkommen eingelagert, wie es der alte Gipsbruch bei Oberau zeigt. Diesen Gipseinschaltungen verdanken die Raibler Wässer ihren großen Sulfatgehalt.

Nach eigenen Beobachtungen stehen, im Gegensatz zur Kartierung von J. NIEDERMAYER (1936), an der Felswand östlich der Mühlbachquellen Raibler Dolomite und Rauhwacken an. Größere Blöcke Rauhwacke sind am Hangfuß zu finden.

2.2.1.2. Norische Stufe

a) Hauptdolomit

Der mächtige norische Hauptdolomit baut den größten Teil der Gebirgsstöcke am Rande des Loisachtales zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe auf. Der Hauptdolomit ist ein bräunlicher bis hellgrauer, feinkristalliner Dolomit; in ihm treten plattige bis dickbankige Partien auf. Es finden sich auch kalkige und bituminöse Einschaltungen. Im ganzen erscheint der Hauptdolomit massig, doch ist er aufgrund der tektonischen Beanspruchung stark geklüftet und zerfällt in splittrige Bruchstücke.

In den zahlreichen feinen Klüften vermag der Hauptdolomit Wasser aufzunehmen; wenn auch die Fließgeschwindigkeit dieser Kluftwässer sehr gering ist. Die Schüttung der Hauptdolomitquellen ist meist gering und wenig schwankend. Wasserstauend im Hauptdolomit können bituminöse Lagen sein (vgl. F. TRAUB, 1956).

b) Plattenkalk

Gut gebankte bis plattige, hell- bis dunkelgraue Plattenkalke treten am Wank in der Lahnenwies- und in der Krottenkopfmulde auf. Sie führen wenige, jedoch meist größere Klüfte und sind überwiegend stark verkarstet. Der Plattenkalk vermag in seinen Karstklüften sehr große Wassermengen aufzunehmen, die er jedoch wegen der großen Fließgeschwindigkeiten schnell wieder abgibt.

2.2.1.3. Rätische Stufe

Das Rät ist vertreten durch die dunklen, kalkig-tonigen Kössener Schichten; die sich in den Kernzonen der Lahnenwies- und Krottenkopfmulde finden. Es handelt sich nur um kleinere Vorkommen. Die tonige Beschaffenheit der Kössener-Schichten wirkt wasserstauend und ist Anlaß für einige kleine Sickerquellen und morastige Stellen.

2.2.2. Jura

Der Jura ist mit einem kleinen Vorkommen von Kalken des Lias und des Dogger in der Lahnenwiesmulde vertreten. Diese sind für die Hydrogeologie des Gebietes ohne wesentliche Bedeutung.

2.2.3. Quartär

2.2.3.1. Pleistozän

Im engeren Untersuchungsgebiet finden sich keine pleistozänen Ablagerungen, die nachweisbar älter sind, als Riß-Würm interglazial.

a) Riß-Würm Interglazial

Östlich Eschenlohe tritt „Auf der Wanne" festverkittete, teilweise löcherige Nagelfluh auf, die von C. W. KOCKEL, M. RICHTER, H. G. STEINMANN (1931) für Riß-Würm Interglazial angesehen wird. J. NIEDERMAYER (1936) erwägt sogar Mindel-Riß-interglaziales Alter. Die Nagelfluh besteht im wesentlichen aus schlecht gerundeten Hauptdolomitkomponenten (J. NIEDERMAYER).

b) Würmeiszeit

Spuren der würmeiszeitlichen größten Vereisung findet man in Form von kristallinen Geschieben an nahezu allen Talflanken bis etwa 1500 m Höhe (C. W. KOCKEL, M. RICHTER, H. G. STEINMANN, 1931). VON KLEBELSBERG (1913/14) gibt für die Eishöhe im Garmischer Becken 1650–1700 m ü. NN an. Langgestreckte Wälle von Loisach-Seitenmoränen, die einem späteren Stadium entstammen, finden sich an der westlichen Talflanke bei Farchant. Auch in den Nebentälern der Loisach liegen Moränenwälle des Loisachhauptgletschers. An den höheren Gipfeln sind die Spuren von lokaler Vergletscherung erkennbar.

Der Würmvereisung gehören die tieferen Seetone, Sande und Kiese in der Auffüllung des Loisachtales an; sie dürften der Vorrückungsphase des Würmgletschers entstammen (C. W. KOCKEL, M. RICHTER, H. G. STEINMANN, 1931).

Die Seetone stellen gelbliche bis graue, schluffige, wasserstauende Seeabsätze dar. Ihre Kornverteilung liegt zwischen 0,5 μ und 100 μ mit Schwerpunkt bei den mittleren Korngrößen (E. SAUER, 1938).

Über den Seetonen lagern Fein- bis Mittelsande mit meist guter Sortierung (s. Abb. 2), während in die Kiese Grobsande eingeschaltet sind, die jedoch überwiegend schlecht sortiert sind.

Die Kiese sind schlecht sortiert (s. Abb. 3). Der Ungleichförmigkeitsfaktor liegt meist über 10 (nach v. ENGELHARDT: $\frac{d_{60}}{d_{10}}$).

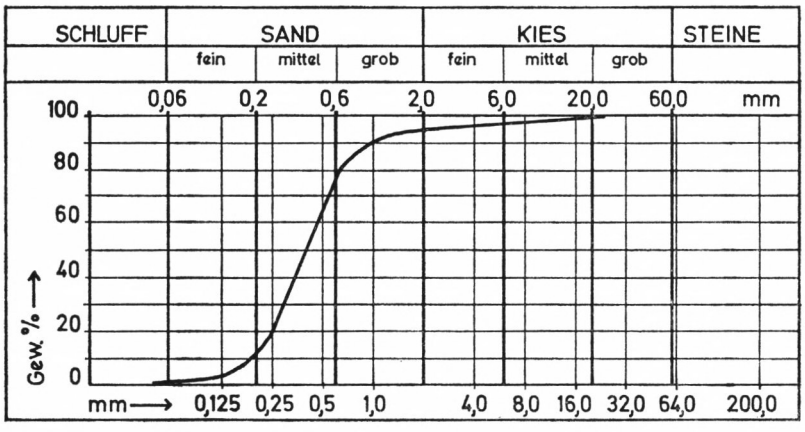


Abb. 2: Siebanalyse des Sandes im 2. Grundwasserstockwerk, der den Seeton überlagert.

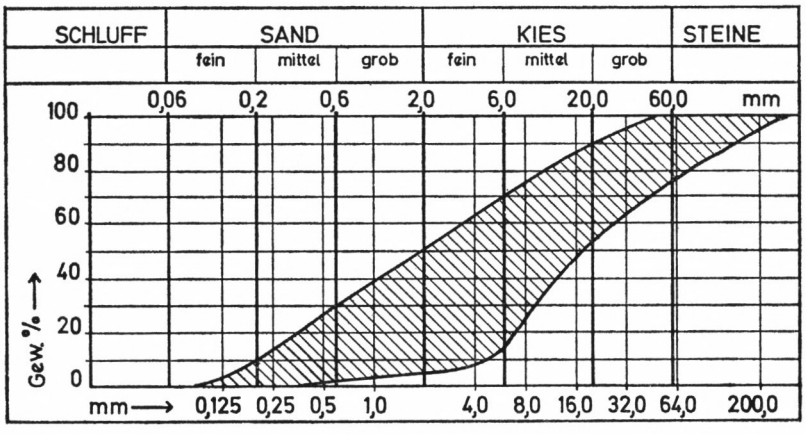


Abb. 3: Kornverteilungsband der Kiese im 2. Grundwasserstockwerk.

2.2.3.2. Holozän

Die höheren Seetone, Kiese und Sande sind postglaziale bzw. holozäne Bildungen. Die Tone enthalten reichlich organisches Material. Die Kiese und Sande sind meist schlecht sortiert (s. Abb. 4).

Rezente Ablagerungen finden sich vorwiegend im Talgebiet. Ferner stellen Bergstürze, Schuttkegel, Sümpfe und Moore holozäne Bildungen dar.

Moore treten vor allem in der Talaue zwischen Farchant und Eschenlohe auf. Die Torflagen werden bis zu 15 m mächtig. Große Schuttkegel breiten sich fächerförmig an den Talrändern aus und beeinflussen z. T. den Lauf der Loisach.

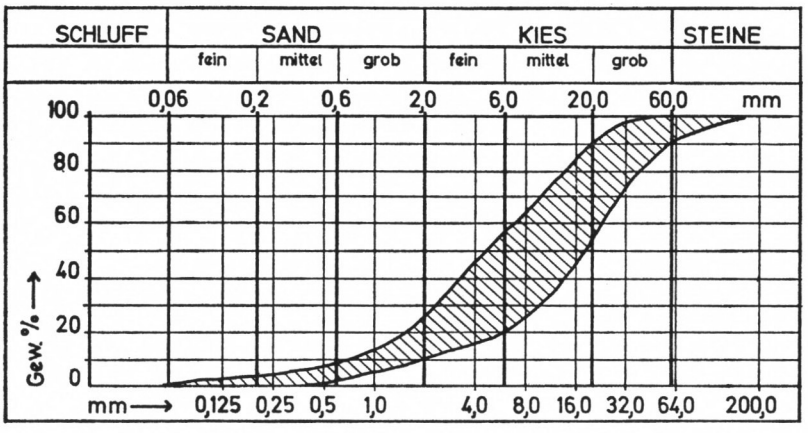


Abb. 4: Kornverteilungsband der Kiese im 1. Grundwasserstockwerk.

3. Tektonik und Hydrogeologie östlich und westlich der Loisach

3.1. Hydrogeologische Untersuchung der östlichen Talflanke des Loisachtales

Der östlich der Loisach liegende Gebirgsstock, das Estergebirge, wird im wesentlichen aus Hauptdolomit und Plattenkalk aufgebaut. Der Höhenunterschied vom höchsten Gipfel, dem Krottenkopf (2085 m), bis zur Talsohle bei Oberau beträgt etwa 1450 m.

Wenig westlich der Esterbergalm liegt am Beginn des Finzbachtales eine etwa 1000 m lange abflußlose Senke. Das Esterbergtal entwässerte ursprünglich zur Loisach, wurde später jedoch durch rückschreitende Erosion des Finzbaches der Isar tributär. Durch einen jungen Bergsturz wurde die Wasserscheide zwischen Isar und Loisach schließlich auf 1285 m erhöht. Der Kaltwassergraben trennte durch die Aufschüttung eines Schuttkegels bei der Esterbergalm eine abflußlose Senke vom Finzbachtal ab (J. NIEDERMAYER, 1936).

In dieser Senke sammeln sich im Frühjahr und im Sommer die Schneeschmelz- und Regenwässer der umliegenden Hänge zu einem periodischen See, der mehrere Hektar Fläche bedecken kann. Dieser See versickert ziemlich rasch in dolinenartigen Bodenvertiefungen an seinem westlichen Ende. Ein unterirdischer Abfluß der versickerten Wässer in Richtung Finzbach ist unwahrscheinlich, da die Finzbachquellen östlich der Esterbergalm in den Sommern 1966 und 1967 bereits ausgetrocknet waren, als der periodische See noch bestand.

Die versickerten Wässer treten zum Teil, nachdem sie einen Weg von mehr als tausend Metern im Schutt zurückgelegt haben, an der Brunnenstube im Regenlain-Graben zutage (vgl. J. NIEDERMAYER, 1936), zum Teil dürften sie jedoch unterirdisch in die Auffüllung des Loisachtales einspeisen. Das etwa 5 km² große Einzugsgebiet der abflußlosen Senke an der Esterbergalm kann somit zum Einzugsgebiet der Loisach gerechnet werden.

3.2. Markierungsversuch im Krottenkopfgebiet

Vom Loisachtal im Westen bis zur Obernach im Osten erstreckt sich eine nach Nordwesten überkippte Doppelmulde, in deren Kern noch Reste von kalkig-tonigen Kössener-Schichten liegen. Die höchsten Gipfel des Krottenkopfgebietes, wie z. B. Krottenkopf, Hohe Kisten und Hoher Fricken, werden aus Plattenkalk aufgebaut; die tieferen Bergflanken bestehen aus Hauptdolomit (s. Abb. 5). Die Muldenachse weist einige Verbiegungen auf; sie kulminiert wenig östlich des Krottenkopfgipfels und am Hohen Fricken (s. Abb. 6).

Der Plattenkalk des Krottenkopfgebietes ist stark verkarstet, so ist das Gelände zwischen Krottenkopf und Simetsberg (1837 m) übersät mit Dolinen und Schlucklöchern. Einzelne Dolinentrichter haben mehr als hundert Meter Durchmesser. Ein mehrere Quadratkilometer großes Teilgebiet zwischen Krottenkopf und Wildsee hat keine oberirdischen Abflußwege.

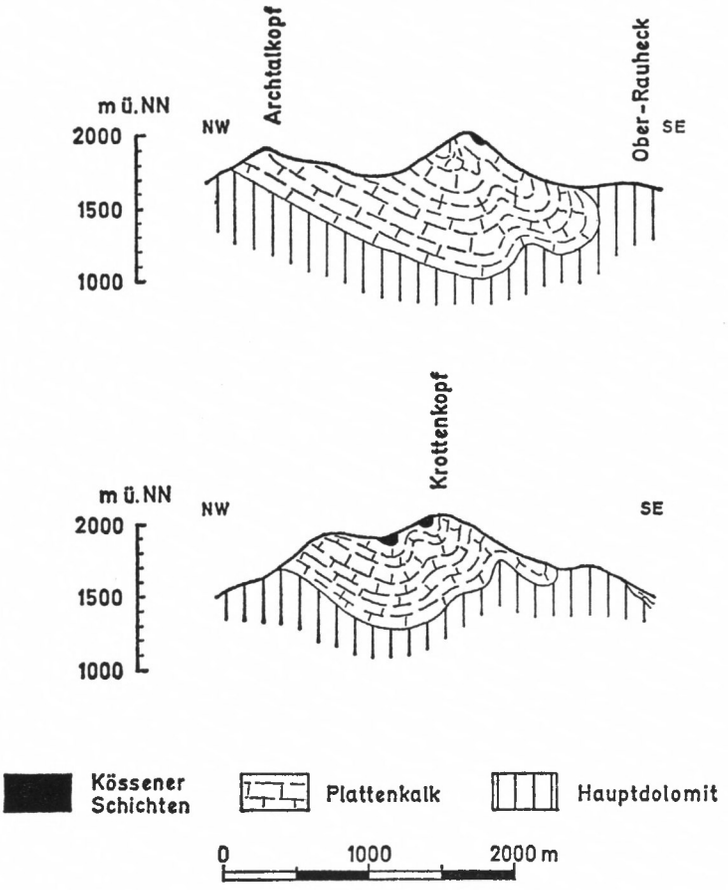


Abb. 5: Geologische Querprofile durch die Krottenkopfmulde.

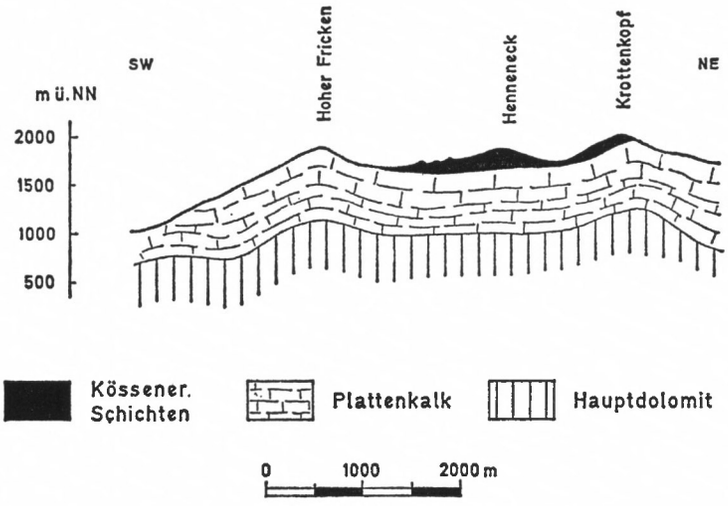


Abb. 6: Geologisches Längsprofil durch die Krottenkopfmulde.

Es war von Interesse, die Abflußwege der in dieser Höhenlage kräftigen Niederschläge (um 2000 mm im Jahr) zu erfassen.

Dazu wurde das Krottenkopfgebiet zunächst tektonisch untersucht. Eine Kluftrose aus 235 Messungen im Plattenkalk des Gebietes zwischen Krottenkopf und Wildsee (s. Abb. 7) läßt deutlich zwei etwa senkrecht aufeinanderstehende Kluftsysteme erkennen. Sehr kräftig erscheinen die beiden Maxima bei 30^g und bei 150^g, die sich auch im Luftbild als Störungslinien oder Dolinenreihen deutlich erkennen lassen. Diese beiden Richtungen gehören zu den am gesamten bayerischen Alpenrand festgestellten Hauptkluftrichtungen (Schmidt-Thome, 1955). Weniger ausgeprägt sind die Maxima bei 80^g und bei 180^g.

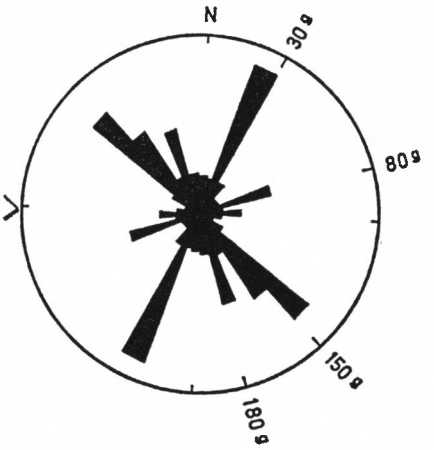


Abb. 7: Kluftrose aus 235 Messungen im Plattenkalk zwischen Krottenkopf und Wildsee.

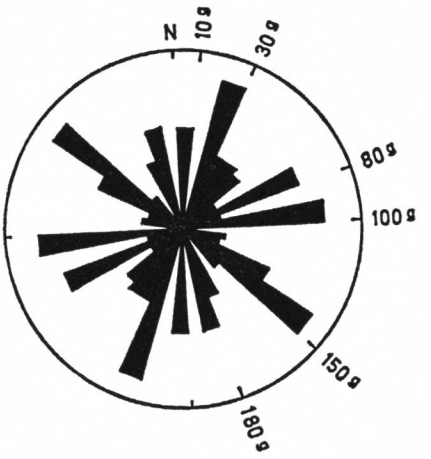


Abb. 8: Kluftrose aus 156 Messungen im Hauptdolomit des Nordflügels der Krottenkopfmulde.

Eine Kluftrose aus 156 Messungen im Hauptdolomit des Nordflügels der Krottenkopfmulde zeigt eine größere Zahl von Kluftmaxima (s. Abb. 8). Zunächst erscheinen die im Plattenkalk gefundenen Kluftmaxima wieder. Daneben treten aber zusätzliche Kluftrichtungen auf. Sie sind verständlich, wenn man bedenkt, daß der dünnbankige Plattenkalk mit Verbiegungen auf tektonische Beanspruchungen reagiert und weniger mit Bruch, während der starre, meist massige Hauptdolomit bei Beanspruchung kräftig zerklüftet wird.

Nach den tektonischen Untersuchungen war eine Wasserbewegung entlang der ausgeprägten Kluftrichtungen von 30^g und 150^g anzunehmen. Eine weitere Abflußmöglichkeit bestand im Muldenkern in Richtung Loisach oder in Richtung Obernach. Bedeutende Quellen befinden sich nur am Talrand der Loisach, der Eschenlaine und der Obernach. Bei der sprunghaften, kräftigen Schüttung der Kuhfluchtquelle bestand der Verdacht, daß sie mit dem Karstgebiet am Krottenkopf in Verbindung steht.

Zur Klärung der unterirdischen Wasserwege wurde im Sommer 1967 mit Unterstützung des Institutes für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung, München, und der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München, ein Markierungsversuch mit den beiden Farbstoffen Uranin und Sulforhodamin-G-extra durchgeführt. Die Probennahme erfolgte mit Hilfe von Aktivkohlesäckchen (F. Bauer, 1967); in denen die verwendeten Farbstoffe absorbiert wurden. Die Aktivkohlesäckchen wurden aus einem Kunststoffgewebe mit einer Maschenweite von 0,7 mm erstellt. Ihre Länge betrug etwa 12 cm, ihre Breite 4 cm. Alle Proben waren numeriert. Sie wurden mit jeweils 6 g Aktivkohle gefüllt und mit Schnur oder Draht freischwimmend, so daß sie ganz durchflutet wurden, an den Quellen oder in den Bächen angebracht.

Um den gesamten Gebirgsstock der Krottenkopfgruppe wurden insgesamt 17 Beobachtungsstellen eingerichtet (s. Abb. 9), entweder an Quellen oder in unzugänglichem Gebiet an Bächen. Als Einspeisungstermin war das Ende der Schneeschmelze vorgesehen, da zu dieser Zeit das Karstwassersystem einen relativ hohen Wasserstand haben mußte. Außerdem war man im Krottenkopfgebiet bei der Einspeisung auf Schneeschmelzwasser angewiesen, da im engeren und im weiteren Bereich der Einspeisungsstellen kein fließendes Wasser vorhanden war.

An der Einspeisungsstelle 1 (s. Abb. 9) in 1650 m Höhe wurden 10 kg Sulforhodamin-G-extra eingebracht; an der Einspeisungsstelle 2 in 1740 m Höhe 10 kg Uranin. Einspeisungsstelle 1 lag am Nordflügel, Einspeisungsstelle 2 im Zentrum der Krottenkopfmulde. Die Muldenachse fällt in diesem Bereich bereits nach Osten in Richtung Obernach ein. Die Einspeisung erfolgte an beiden Einspeisungsstellen am 3. Juli 1967 um 17 Uhr.

Nach einer längeren Zeit trockenen, warmen Wetters, während der es zum weiteren Abschmelzen der Restschneedecke gekommen war, erfolgte in der Nacht nach der Einspeisung ein heftiger Gewitterregen der in Garmisch-Partenkirchen 11 mm Niederschlag brachte. Dadurch wurde der Transport der Farbstoffe im Karstwassersystem sicherlich begünstigt und beschleunigt.

Die Probennahme konnte von einer Person durchgeführt werden, da nur die Aktivkohlesäckchen entnommen und neu eingesetzt werden mußten. An den Beobachtungsstellen A, C, D1, D2, D3, F und G wurden in der ersten Woche täglich zur gleichen Uhrzeit Proben entnommen, an den anderen Beobachtungspunkten in zweitägigem Abstand. An den Beobachtungsstellen A, C, D1, D2, D3, F und G wurden außerdem Proben 14 Tage, 21 Tage und 28 Tage nach der Einspeisung entnommen. Nach 110 Tagen wurde an allen Beobachtungsstellen eine Probe entnommen, die seit der Einspeisung in dem jeweiligen Gerinne gehangen hatte.

An der Beobachtungsstelle P, bei den von den Gemeindewerken Garmisch-Partenkirchen gefaßten Regenlainquellen, entnahmen freundlicherweise die Gemeindewerke Garmisch-Partenkirchen während der ersten fünf Tage nach der Einspeisung Wasserproben, die jedoch ebenso negativ waren, wie eine vierwöchige Aktivkohledauerprobe.

Die Aktivkohlesäckchen wurden nach der Entnahme einzeln in Plastiktüten verpackt und später getrocknet. Je 3 g der getrockneten Aktivkohlekörner einer Probe wurden in einem Reagenzglas mit 20 ml eines Gemisches aus 96%igem Äthanol und 15%iger wäßri-

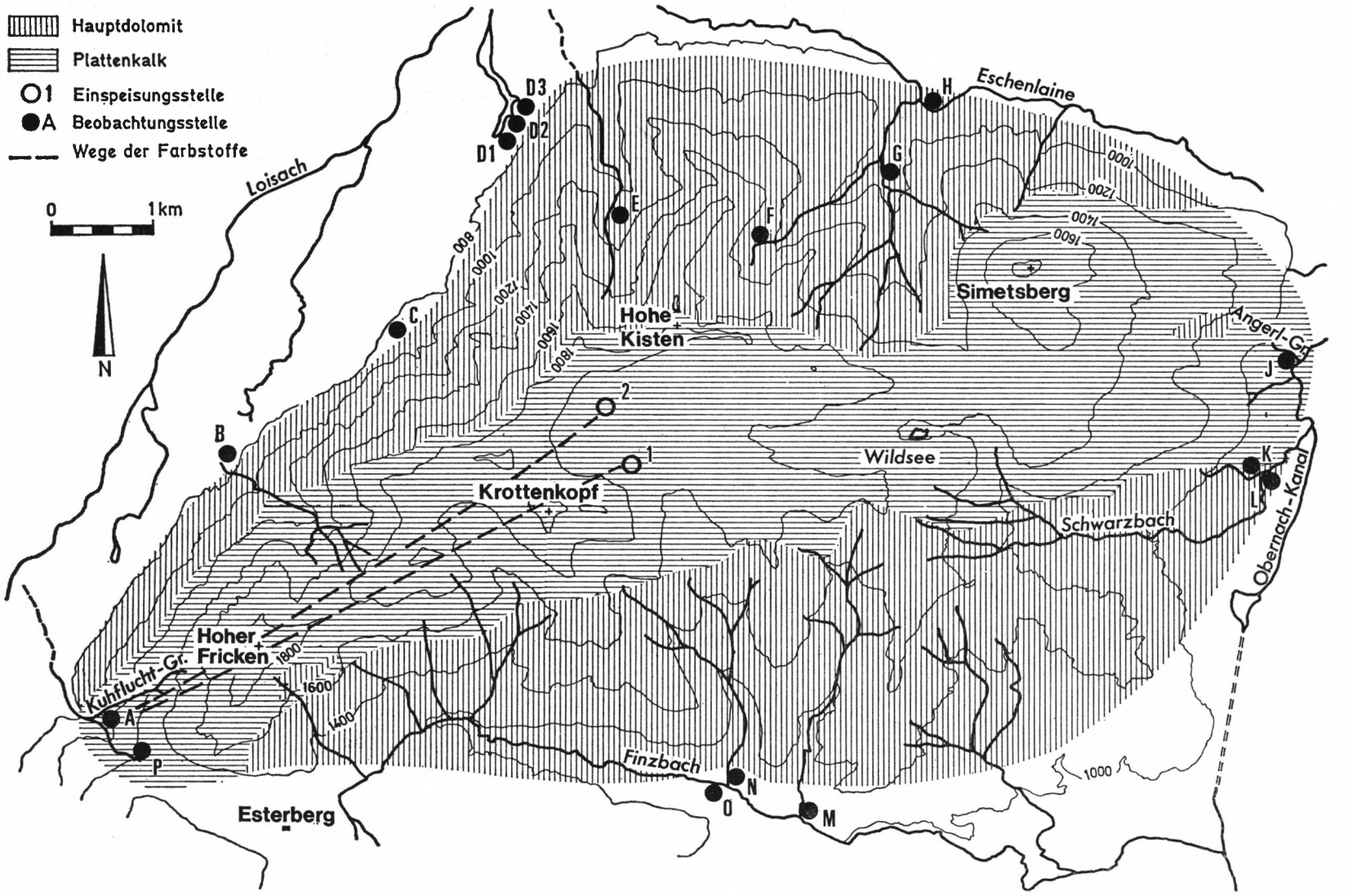


Abb. 9: Lageplan zum Färbeversuch am Krottenkopf.

ger Kalilauge im Mischungsverhältnis 1 : 1 versetzt und geschüttelt. Die Reagenzgläser wurden mit PVC-Stopfen verschlossen und innerhalb von 48 Stunden noch zweimal geschüttelt. Nach 48 Stunden wurden von den Proben je 5 ml abgefüllt und mit einem Fluorometer Modell 111 der Firma TURNER, Palo Alto, Kalifornien, untersucht. Für den Nachweis der Fluoreszenz der beiden Farbstoffe Uranin und Sulforhodamin-G-extra wurden verschiedene Filterkombinationen verwendet.

Während das Sulforhodamin-G-extra nicht durch Naturfluoreszenzen gestört wurde, traten im Bereich der Fluoreszenz des Uranins z. T. kräftige Störungen durch die Fluoreszenz von im Wasser enthaltenem Chlorophyll auf.

Der Chlorophyllgehalt der Quellen und Bäche zeigte sich abhängig von den Niederschlägen. Der kräftige Gewitterregen in der Nacht vom 3. 7. auf den 4. 7. 1967 war der erste Niederschlag nach einer längeren Trockenperiode. Er spülte von den vom Schnee freigewordenen Hängen viel organisches Material in die Bäche, das sich in den entnommenen Proben nach dem Niederschlag als ein sprunghafter Anstieg der grünen Fluoreszenz bemerkbar machte. Als Farbindikation des Uranins darf diese Fluoreszenz nicht angesehen werden; denn beim Ansäuern der schwach alkalischen Wasserproben mit konzentrierter Salzsäure trat keine wesentliche Verringerung der Fluoreszenz ein. Bei Anwesenheit von Uranin hätte sich die Fluoreszenz bedeutend verringern müssen, da die Uraninfluoreszenz nicht säurebeständig ist (W. KÄSS, 1963/64). Bereits in den Proben, die am nächsten Tag entnommen wurden, war die grüne Fluoreszenz stark abgeklungen. Die chlorophyllreiche, aber uraninfreie Hochwasserwelle war also abgelaufen.

Während des folgenden Untersuchungszeitraumes wurden nur noch an der Kuhfluchtquelle hohe Werte der Fluoreszenz festgestellt. Das bedeutet, daß außer an der Kuhfluchtquelle an keiner Beobachtungsstelle nachweisbare Spuren der eingespeisten Farbstoffe innerhalb der Beobachtungszeit eintrafen. Uranin konnte ebenso, wie Sulforhodamin-G-extra, nur in der Kuhfluchtquelle nachgewiesen werden.

Die Kuhfluchtquelle liegt etwa 5 km von den Einspeisungsstellen entfernt in 1150 m Höhe an der Ostflanke des Loisachtales. Der Höhenunterschied zwischen Einspeisungsstellen und Quelle beträgt 500 bis 590 m. Die Quelle schüttete zur Zeit der Einspeisung etwa 100 l/s. Nach dem kräftigen Regen vom 3./4. 7. 1967 erhöhte sich die Schüttung auf mehrere 100 l/s; bis auf etwa 600 l/s sogleich nach dem Regen.

An der Kuhfluchtquelle, an der die Hauptindikation erwartet worden war, wurden neben den Aktivkohleproben vom 2. 7. bis zum 9. 7. auch Wasserproben entnommen. Nach den Nullproben vom 2. und 3. 7. zeigte auch die Aktivkohleprobe vom 4. 7. um 19 Uhr noch keine Farbspuren. In der Wasserprobe vom 5. 7. 15 Uhr dagegen war bereits die Fluoreszenz von beiden Farbstoffen nachzuweisen (s. Abb. 10). Wie sich bei der Auswertung der folgenden, in kürzeren Abständen entnommenen, Wasserproben zeigte, war das Maximum des Farbdurchganges für Sulforhodamin-G-extra schon am 5. 7. vor 15 Uhr erfolgt. Das Maximum des Uranindurchganges konnte noch erfaßt werden. Es erfolgte am 5. 7. um 21 Uhr.

Die Konzentration des Sulforhodamin-G-extra-Austrittes war etwas geringer als die des Uraninaustrittes (man beachte in Abb. 10 und 11 die unterschiedlichen Skalen für die beiden Farbstoffe). Das ist wohl damit zu erklären, daß der Höhepunkt des Sulforhodamin-G-extra-Farbdurchganges nicht direkt erfaßt wurde.

Die Konzentration der Farbstoffe war so groß, daß das Wasser des Kuhfluchtgrabens stark gefärbt war. Nach Auskunft eines Beobachters traten die ersten sichtbaren Farbspuren im Wasser des Kuhfluchtgrabens an der Brücke des Fahrweges nach Oberau am 5. 7. gegen 11 Uhr vormittags auf. Das bedeutet, daß die ersten Farbspuren etwa in den

frühen Morgenstunden des 5.7. an der Kuhfluchtquelle eintrafen. Das sind 35–40 Stunden nach der Einspeisung, was einer Fließgeschwindigkeit von etwa 150 m/Std. entspricht. Das Hauptmaximum des Sulforhodamin-G-extra Durchganges zeigte sich nach etwa 40 Stunden (s. Abb. 10). Das Uranin hatte in seinem Durchgang nur einen Höhepunkt, und zwar am 5. 7. gegen 21 Uhr. Das ist 52 Stunden nach der Einspeisung, was einer Fließgeschwindigkeit von etwa 100 m/Std. entspricht. Beide Konzentrationen nahmen nach den Maxima (das Sulforhodamin-G-extra nach dem 2.) asymptotisch ab und hatten sechs Tage nach der Einspeisung den Nullwert nahezu erreicht. Bei einer mittleren Schüttung der Kuhfluchtquelle von 250 bis 300 l/s während der Zeit vom 4. 7. bis 9. 7. ergibt sich,

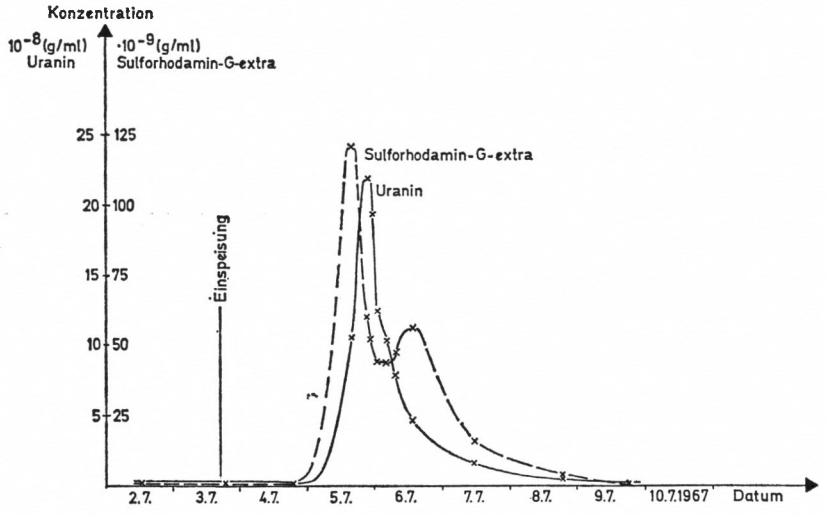


Abb. 10: Der zeitliche Nachweis des Uranins und des Sulforhodamin-G-extra in Wasserproben der Kuhfluchtquelle.

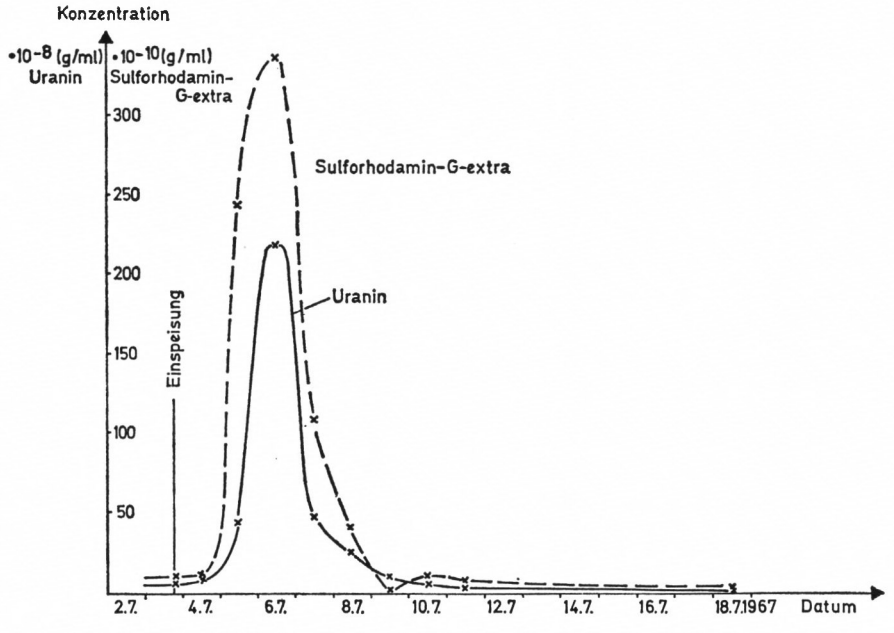


Abb. 11: Der zeitliche Nachweis des Uranins und des Sulforhodamin-G-extra in den Aktivkohleproben der Kuhfluchtquelle.

mit den in den Wasserproben enthaltenen Konzentrationen, für das Uranin eine Ausbeute von 5–6 kg. Für das Sulforhodamin-G-extra ergibt sich die geringere Ausbeute von 3–4 kg. Das ist dadurch zu erklären, daß die frühe Spitze des Sulforhodamin-G-extra in keiner Wasserprobe erfaßt wurde, und daß die Schüttung der Kuhfluchtquelle zu dieser Zeit sehr hoch war.

Bei der Untersuchung der Aktivkohleproben zeigte es sich, daß in ihnen das Uranin zwanzig- bis dreißigfach gegenüber dem Sulforhodamin-G-extra angereichert war.

In den aus den Aktivkohleproben gewonnenen Durchgangskurven (Abb. 11) zeichnen sich die Maxima des Farbdurchganges verständlicherweise erst am 6. 7. ab, da die Proben die hohen Konzentrationen vom Abend des 5. 7. bis zum Abend des 6. 7. enthalten. Für das Sulforhodamin-G-extra scheint der Farbdurchgang am 9.7. im wesentlichen beendet zu sein, für das Uranin am 11. 7.

3.2.1. Schlußfolgerungen zum Markierungsversuch

Die Kuhfluchtquelle war die einzige Quelle in der Umrandung des Krottenkopfgebietes, die eine Farbindikation aufwies. Sicherlich gelangt auch Wasser aus dem verkarsteten Krottenkopfgebiet zu anderen Quellen. Jedoch sind an anderen Stellen die Wassermengen und Fließgeschwindigkeiten sehr gering. Das zeigt auch die relativ hohe Wiedergewinnung der Farbstoffe an der Kuhfluchtquelle. Die Wetterverhältnisse führten zu einem starken Anstieg des Karstwassersystems. Dennoch zeigte lediglich die Kuhfluchtquelle eine Färbung. Das bedeutet, daß der Hauptdolomit die im Plattenkalk enthaltenen Karstwässer ziemlich vollständig am Ausfluß hindert (s. Abb. 5). Im Plattenkalk, im Kern der Krottenkopfmulde, fließt das Wasser wie in einem Gerinne zur Loisach hin ab.

Das Einzugsgebiet der Kuhfluchtquelle endet im Osten am Wildsee. Hier versetzt eine kräftige Loisachstörung den östlichen Teil der Krottenkopfmulde nach Norden, so daß damit schon eine östliche Begrenzung des Einzugsgebietes gegeben ist. Dann aber ist auch die Höhenlage hier bereits so gering, daß kaum noch ein Gefälle in Richtung Kuhfluchtquelle vorhanden ist. Die östlich des Wildsees gelegenen verkarsteten Gebiete entwässern schon nach Osten in Richtung Obernach.

Das wesentliche Ergebnis des Markierungsversuches am Krottenkopf ist es, daß ein etwa 10 km² großes Gebiet mit hohen Niederschlägen, das außerhalb des Niederschlagsgebietes der Loisach liegt, unterirdisch zur Loisach hin entwässert.

Bei der Untersuchung der Proben ergab sich, daß das Sulforhodamin-G-extra den Vorteil aufweist, von Naturfluoreszenzen nicht gestört zu werden, wie das Uranin. Dagegen hat es den Nachteil, in der Aktivkohle nicht so stark angereichert zu werden. Bei Markierungsversuchen können durchaus zwei Farbstoffe gleichzeitig eingespeist werden, da ihre Fluoreszenzen bei Verwendung verschiedener Filterkombinationen in einem Fluorometer voneinander unterschieden werden können.

3.3. Hydrogeologische Untersuchung der westlichen Talflanke des Loisachtales

Die westlich an das Loisachtal angrenzenden Gebirgsstöcke (Kramer 1981 m, Schafkopf 1380 m, Großer Laber 1466 m, Höhenberg 956 m) haben mit Ausnahme des Kramers eine wesentlich geringere Höhe als die östlichen. Das kommt auch darin zum Ausdruck, daß am westlichen Talrand nur der Schuttkegel des Lahnenwiesgrabens von Bedeutung ist, während an der östlichen Talseite mehrere große Schuttfächer auftreten.

Das westliche Randgebiet des Loisachtales zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe wird aus einer Anzahl WSW-ENE streichender Sättel und Mulden gebildet. Drei Hauptelemente beherrschen das Gebiet: die aus Hauptdolomit und Plattenkalk bestehende nach N überschobene Kramermasse, die Lahnenwiesmulde, in der Trias, Jura und Kreide anstehen sowie der aus Hauptdolomit und Raibler-Schichten bestehende Oberauer Sattel. In diesem Gebiet sind Loisachstörungen (NNE–SSW) ziemlich häufig, Ammerstörungen (NW–SE) treten dagegen relativ zurück (KOCKEL–RICHTER–STEINMANN, 1931). Eine erhebliche Verschiebung der Wasserscheiden tritt lediglich im Gebiet der Maulenbachquellen am Ettaler Berg westlich von Oberau auf.

3.4. Quellbeobachtungen in den Gebirgsstöcken

In den Gebirgsstöcken, die das Loisachtal begleiten, gibt es nur wenige, ganzjährig fließende Quellen. Diese entspringen meist aus größeren Schuttanhäufungen (Abb. 12).

Als Kluftquelle aus anstehendem Fels entspringt die Oberbodenquelle (Quell-Nr. 29) 500 m südlich der Dax-Kapelle am Wank in 884 m Höhe. Sie tritt aus Ost-West streichenden, südfallenden Plattenkalken hervor. Ihre Schüttung schwankt zwischen 1 und 20 l/s.

Die Brunnhäuslquelle (Quell-Nr. 30), 200 m nördlich der Talstation der Wankbahn in Garmisch-Partenkirchen, entspringt aus Hauptdolomit und schüttet zwischen 3 und 20 l/s.

Die ebenfalls aus Fels austretenden Gießenbachquellen (Quell-Nr. 36), die für die Gemeinde Oberau gefaßt sind, schütten 2,5–10 l/s. Sie treten an einer Störung an der Grenze Hauptdolomit gegen Raibler-Schichten auf.

Neben den genannten Quellen schütten auch die Reschbergquellen (Quell-Nr. 33 und 34) an den Reschbergwiesen ganzjährig. Beide entspringen aus Schutt und liegen in der Lahnenwiesmulde. Die Maulenbachquellen bei Oberau und die Esterberg-Quellen schütten ebenfalls ganzjährig.

Von Bedeutung sind die Maulenbachquellen (Quell-Nr. 37), die für ein Triebwerk in Oberau gefaßt sind. Sie entspringen aus diluvialen Schottern am sogenannten Ettaler-Berg westlich Oberau (s. S. 32) und schütten im Mittel 1000 l/s. Das Minimum beträgt 800 l/s, das Maximum 1200 l/s. Der Chemismus dieser Quellen ist ziemlich gleichbleibend.

Die Esterberg-Quellen (Quell-Nr. 24) entspringen aus größeren Schuttmassen zwischen Wank und Hohem Fricken in 1200 m Höhe. Ihre Schüttung schwankt zwischen 25 und 150 l/s. Das Wetter beeinflußt die Quellschüttung und den Wasserchemismus deutlich.

Neben den genannten Quellen gibt es in den angrenzenden Gebirgsstöcken, außer einigen Sickerstellen, keine ganzjährig fließenden Quellen.

Von den nicht ganzjährig fließenden Quellen ist vor allem die Kuhfluchtquelle von Bedeutung (Quell-Nr. 23). Sie tritt in 1150 m Höhe aus Plattenkalk an Klüften aus, nachdem sie ein ausgedehntes Höhlensystem durchflossen hat (K. CRAMER, 1967). Sie stellt eine Karstquelle dar, die nach längeren Trockenzeiten und Frostperioden trockenfällt. Zur Zeit der Schneeschmelze und nach kräftigen Regenfällen erreicht ihre Schüttung mehr als 2000 l/s. Der Chemismus ihrer Wässer schwankt je nach Aufenthaltsdauer des Karstwassers im Gebirgskörper, ihre Temperatur je nach Jahreszeit zwischen 3 °C (Frühjahr) und 6 °C (Sommer und Herbst).

Die Schüttung der zeitweilig fließenden Quellen, wie z. B. der Kuhfluchtquelle (Quell-Nr. 23) und der Finzbachquelle (Quell-Nr. 28), geht in Trockenzeiten stets schnell zurück. Lediglich die Hauptdolomitquellen vermögen etwas länger zu fließen und auch ihre Schüttung ist nicht so sprunghaft.

Tab. 1: Chemische Analyse der Malenbachquelle vom 26. 1. 1961
(Analyse der Wasserwerke der Landeshauptstadt München)

Temperatur 7,3 °C	
Cl'	1,5 mg/l
SO_4''	40,9 mg/l
NO_3'	4,5 mg/l
Ca^{++}	81,5 mg/l
Mg^{++}	27,2 mg/l
CO_2geb.	73,7 mg/l
Fe (ges.)	0,01 mg/l
SiO_2	2,5 mg/l
$KMnO_4$-Verbrauch	2,2 mg/l
Gesh.	12,0 °DH
Karbh.	9,4 °DH
pH	7,28
Leitf.	322 µ S/cm
Trock. R.	221,2 mg/l

Tab. 2: Chemische Analysen der Esterbergquellen
(Analysen der Staatl. Chem. Untersuchungsanstalt, München)

	24. 6. 1944	4. 8. 1964
Cl'	2,0 mg/l	– mg/l
SO_4''	–	4,0 mg/l
NO_3'	Spur mg/l	– mg/l
CO_2 geb.	42,9 mg/l	– mg/l
Fe (ges.)	0,07 mg/l	– mg/l
Gesh.	5,6 °DH	11,2 °DH
Karb. H.	5,5 °DH	10,1 °DH
Trock. R.	120 mg/l	170 mg/l

Tab. 3: Chemische Analysen der Kuhfluchtquelle
(Analysen der Wasserwerke der Landeshauptstadt München und eigene Beobachtungen)

	16. 11. 1961	14. 3. 1966	3. 8. 1966	25. 9. 1966
Cl'	1,3 mg/l	0,4 mg/l	–	–
SO_4''	9,6 mg/l	8,0 mg/l	–	–
NO_3'	3,0 mg/l	4,0 mg/l	–	–
Ca^{++}	60,2 mg/l	56,0 mg/l	–	–
Mg^{++}	14,0 mg/l	15,9 mg/l	–	–
CO_2 geb.	58,4 mg/l	61,7 mg/l	–	–
$KMnO_2$-Verbrauch	6,2 mg/l	5,4 mg/l	–	–
Ges. H.	8,3 °DH	7,9 °DH	7,4 °DH	7,25 °DH
Karb. H.	7,4 °DH	7,5 °DH	6,2 °DH	6,2 °DH
pH	8,20	8,1	–	–
Leitf.	228 µ S/cm	242 µ S/cm	–	–
Trock. R.	–	142,5 mg/l	–	–
Temperatur	6,2 °C	–	5,2 °C	6,4 °C

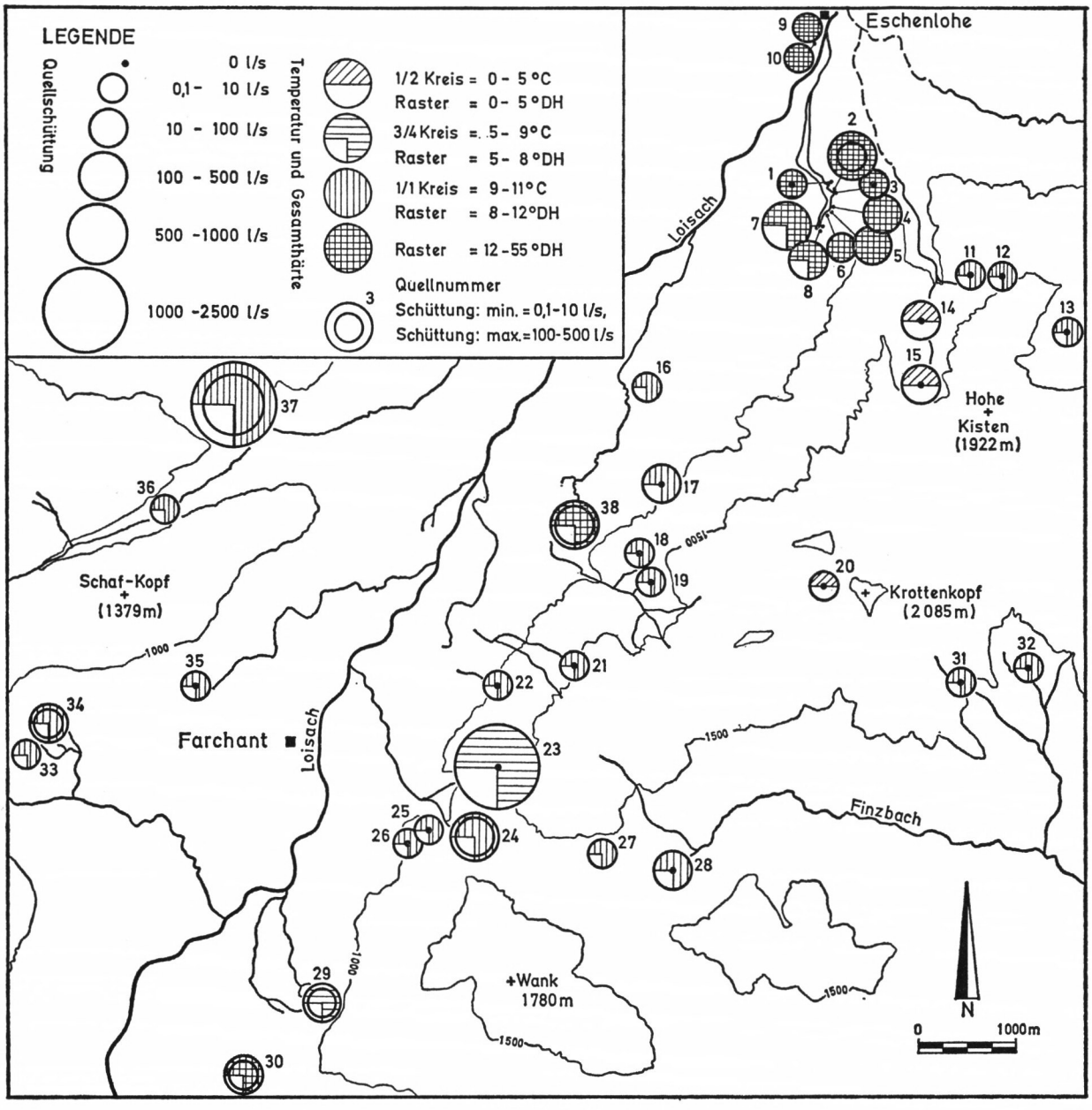


Abb. 12: Temperatur, Gesamthärte und Schüttung der Quellen des Gebietes zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe.

Im Untersuchungsgebiet lassen sich mehrere Quelltypen unterscheiden:

a) Schuttquellen

Sie entspringen aus mehr oder minder großen Schuttmassen. Sind die Schuttmassen groß genug und ist ein geeigneter Stauer (Moräne, Kössener Schichten) vorhanden, so können die Quellen ganzjährig fließen, wie die Esterberg-Quellen und die Reschberg-Quellen. Ist die Aufenthaltsdauer des Wassers im Untergrund länger, wie z. B. in den ganzjährig fließenden Schuttquellen, so enthalten sie eine größere Anzahl gelöster Ionen,

da die Bestandteile des Schuttkörpers mehr Angriffsflächen bieten als ein Festgestein. Es gibt jedoch auch Quellen aus groben, lockeren Schuttmassen, die von Regen- oder Schneeschmelzwasser schnell durcheilt werden, wie einige Quellen nördlich der Hohen Kiste. Ihre Gesamthärte ist gering, ihre Temperatur gleicht sich der Lufttemperatur an und ihre Schüttung ist stark schwankend (s. Tab. 4).

Tab. 4: Die verschiedenen Quelltypen in den Gebirgsstöcken am Rande des Loisachtales (Quell-Nummern entsprechend Abb. 12)

	Quell-Nr.	Schüttung max l/s	Schüttung min l/s	Höhe m ü. NN	Temperatur °C	Ges. H. °DH	Karb. H. °DH
a) Schuttquellen							
Esterberg	24	150	25	1200	5,8–7,0	5,5–11,5	5,5–10,5
Archtal	15	30	0	1400	4,8	3,5	3,5
Archtal	14	15	?	1350	3,6	4,5	4,0
Fahrmannslaine	18	1	0	1300	8,8	9,0	7,5
Regenlaine	26	0,5	0	1100	8,3	9,5	8,0
Finzbach	28	20	0	1200	5,8	10,0	8,5
Reschberg	33	4	1	960	7,4	10,1	9,4
Reschberg	34	16	8	960	7,1	10,6	9,4
Wassertalbach	35	5	0	680	8,2	11,0	9,5
b) Hauptdolomitquellen							
Pustertallaine	13	10	0	1320	5,6	9,0	8,0
Nasse Wand	17	15	0	900	6,2	8,5	7,0
Archtal	12	5,0	0	1200	6,3	8,5	7,5
Archtal	11	1,0	0	1150	6,8	9,0	8,0
Fahrmannslaine	19	1,5	0	1380	6,4	8,5	7,5
Regenlaine	25	2,0	0	1150	5,5	9,5	7,0
Brunnhäusl	30	20,0	3,0	700	8,0–9,0	14,0	12,5
Gießenbach	36	10	2,6	890	7,4	12,0	10,0
c) Plattenkalkquellen							
Kuhfluchtgraben	23	2000	0	1260	3,0–6,4	7,2–8,3	6,2–7,5
Oberboden	29	20	1	950	5,5	7,5	6,8
Erletsbügel Gr.	21	2	0	1500	5,8	8,0	7,0
Kössener Schichten							
Krottenkopf-Hütte	20	2	0	1850	4,2	5,0	4,5

b) Hauptdolomitquellen

Sie treten aus Klüften oder an asphalthaltigen Lagen aus. Ihre Schüttung ist weit geringer und weniger schwankend als die der Plattenkalkquellen. Wegen der feinen Zer-

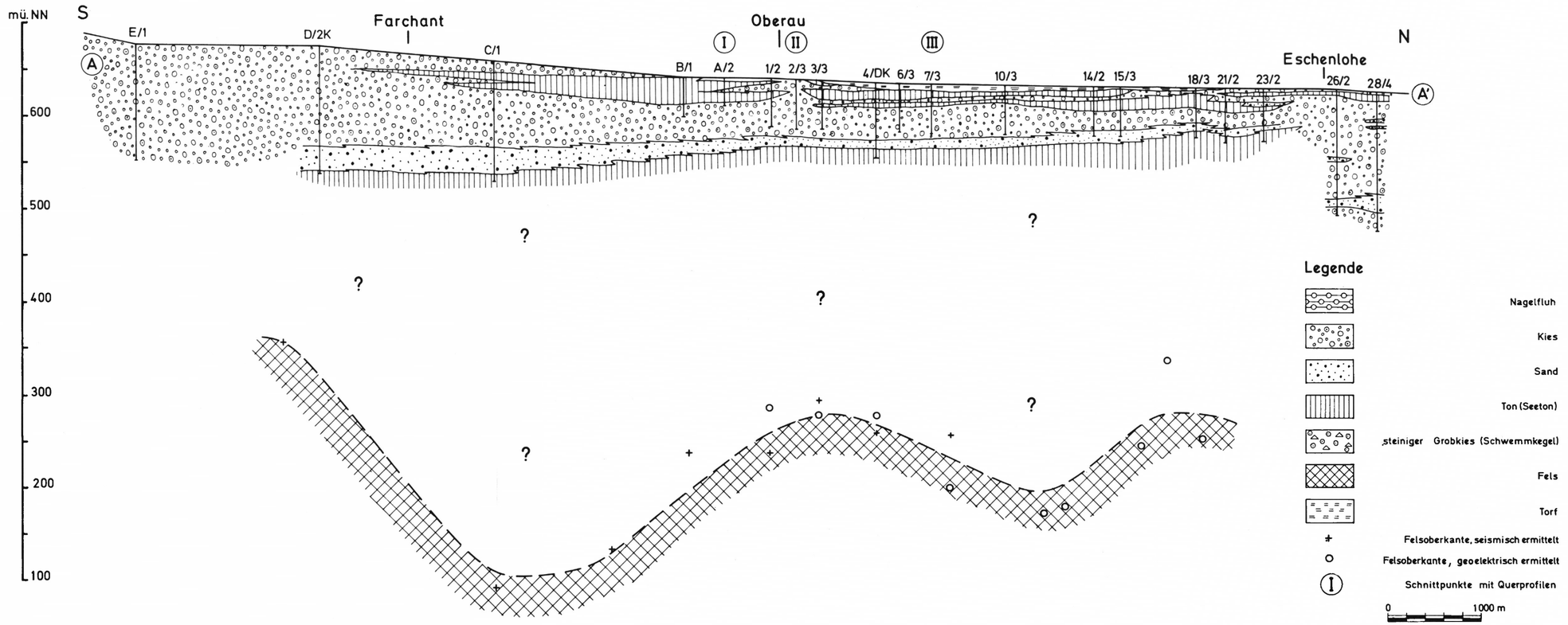


Abb. 13: GEOLOGISCHES NORD - SÜD - PROFIL DURCH DAS LOISACHTAL

klüftung ist die Aufenthaltsdauer des Wassers im Hauptdolomit wesentlich länger. Dadurch haben die Wässer eine größere Lösungsmöglichkeit. Ihre Gesamthärte liegt daher durchschnittlich um 1–2 °DH höher als die der Plattenkalkwässer. Die Temperaturen schwanken zwischen 5,0 und 10,0 °C.

c) Plattenkalkquellen

Sie fließen aus Klüften (Oberbodenquelle) oder Höhlensystemen (Kuhfluchtquelle) und schwanken in ihrer Schüttung sehr stark. In dem meist stark verkarsteten Plattenkalk fließen die Wässer rasch zu den Quellen und wegen der kurzen Berührungsmöglichkeit mit dem Gestein ist ihre Gesamthärte gering. Sie liegt im Mittel bei 7,0 °DH. Die Temperaturen schwanken zwischen 3,0 und 7,0 °C.

d) Quellen aus Kössener-Schichten

Sie treten meist als Sickerstellen in tonig-schmierigem Gelände auf. Die Schüttungen sind gering, ebenso die Gesamthärte. Die Temperaturen schwanken zwischen 4,0 und 6,0 °C.

Die Beobachtungen über den Chemismus von Kalk-, Dolomit- und Schuttquellen stimmen weitgehend mit den von J. Zötl (1960/61) im nordostalpinen Karst festgestellten Verhältnissen überein.

Während der Schneeschmelze und nach kräftigen Regenfällen finden sich in den Gebirgsstöcken zahlreiche Wasseraustritte. Sie haben meistens nur eine geringe Schüttung und versiegen nach sehr kurzer Zeit wieder. Sie wurden bei den Quellbeobachtungen nicht berücksichtigt.

4. Hydrogeologie des Tales von Garmisch-Partenkirchen bis Eschenlohe

4.1. Talgeschichte und Aufbau der Talfüllung

Das Loisachtal zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe stellt einen tektonisch bedingten, glazial vertieften Trog dar. Sein Verlauf ist vermutlich bereits während des Tertiärs tektonisch vorgezeichnet worden. Die Gletscher der alpinen Vereisungen hielten sich auf ihrem Wege ins Alpenvorland an diese präglazial bereits als Tal ausgebildete Linie und hobelten dabei einen tiefen Taltrog aus. Nach seismischen Messungen des Institutes für angewandte Geophysik der Universität München liegt die Felsoberkante durchschnittlich 300 m, teilweise jedoch mehr als 500 m unter der heutigen Talsohle (Abb. 13).

Nach H. Reich (1955) ist diese große Tiefe nicht allein durch glaziale Ausräumung zu erklären, vielmehr rechnet er mit isostatischen Bewegungen. Er nimmt vor allem großräumige Absenkungen im jüngeren Pleistozän an, in deren Verlauf erodierte Flußtäler wieder zugeschüttet wurden.

Im Frühwürm lag im Loisachtal ein See, der vermutlich durch rißglaziale Moränen aufgestaut war. Nach D. Aigner (1913) zog sich am Vestbühl bei Eschenlohe ein Hauptdolomitriegel quer durch das Tal, der den See aufstaute. Bei Aufschlußbohrungen in der Eschenloher Enge fanden sich jedoch keine Anzeichen für eine solche Felsschwelle. Statt

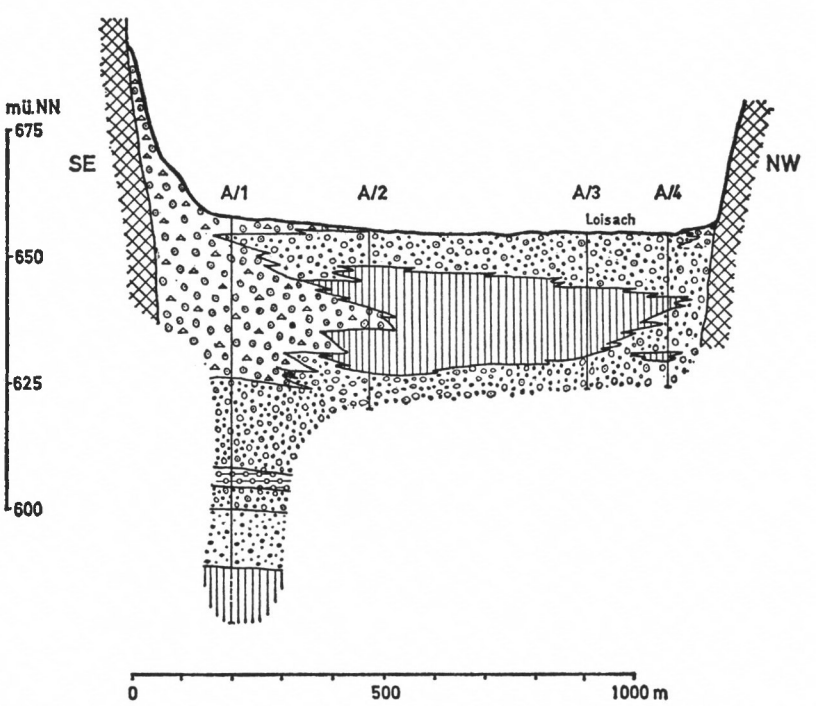


Abb. 14: Geologisches Querprofil I durch das Loisachtal (Legende s. Abb. 13).

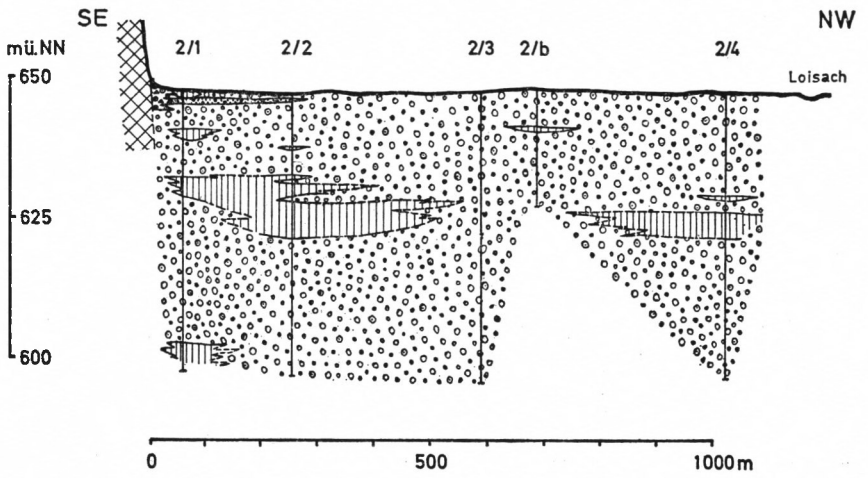


Abb. 15: Geologisches Querprofil II durch das Loisachtal (Legende s. Abb. 13).

dessen wurden häufig Nagelfluhbänke angetroffen. Wahrscheinlich handelt es sich dabei um verkittetes Moränenmaterial der Rißeiszeit. Ferner hält D. AIGNER das Seekreidevorkommen bei Kaltenbrunn, östlich von Garmisch-Partenkirchen, in 940 m Höhe, für einen Hinweis, daß der Spiegel des Sees im Loisachtal mindestens 940–950 m Höhe erreichte. Es finden sich jedoch im ganzen übrigen Loisachtal keine Anzeichen für einen Seespiegel in dieser Höhe.

Bei den Seekreideablagerungen von Kaltenbrunn handelt es sich entweder um Sedimente eines isolierten Sees, oder sie sind, was wahrscheinlicher ist, mit den in der Umgebung des Barmsees bei Mittenwald in ähnlichen Höhenlagen festgestellten Seekreidevor-

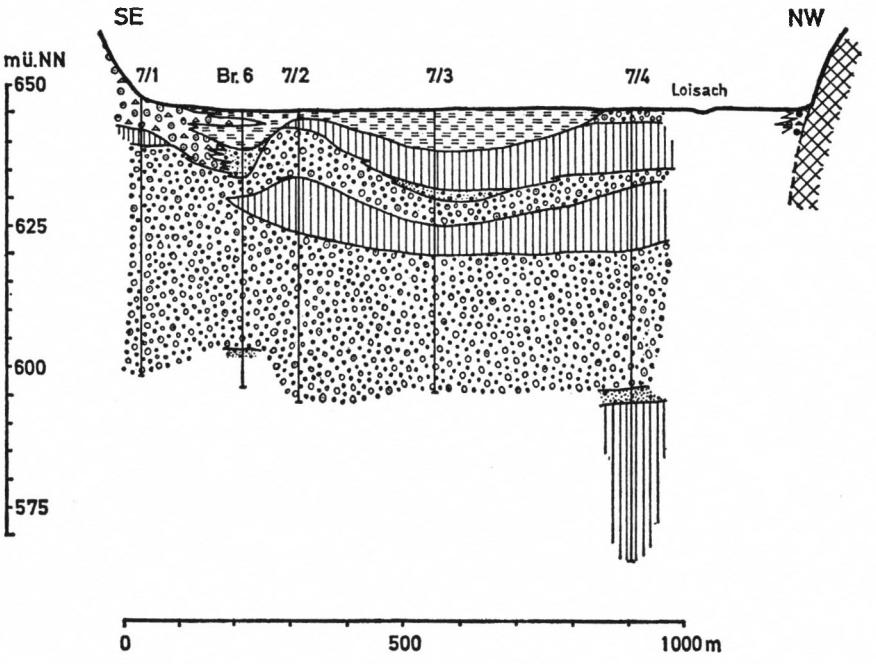


Abb. 16: Geologisches Querprofil III durch das Loisachtal (Legende s. Abb. 13).

kommen – nach F. Levy (1920) 930 m – in Verbindung zu bringen. Nach F. Levy lag die Wasserscheide Loisach/Isar ursprünglich bei Gschwandt in 1000 m Höhe. Daß die Seekreide von Kaltenbrunn östlich davon liegt, spricht ebenfalls dafür, daß sie nicht mit dem See im Loisachtal in Zusammenhang zu bringen ist.

Der Spiegel des Sees im Loisachtal dürfte nur unwesentlich höher gelegen haben als die heutige Talsohle, da die niedrigen Anfragungen von Höhenberg und Vestbühl (670–835 m) keinen stärkeren Aufstau zuließen. Nach F. Levy (1920) entwässerte der See zeitweise durch das Katzental bei Oberau, dessen höchster Punkt bei 750 m liegt. Somit kann man als größte Seespiegelhöhe des früheren Sees im Loisachtal etwa 750–800 m annehmen.

Die in dem See abgelagerten tieferen Seetone sind nach C. W. Kockel–M. Richter–H. G. Steinmann (1931) offenbar in die Vorrückphase des Würmgletschers zu stellen. Mit dem Herannahmen des Hauptgletschers der Würmvereisung wurde der See von Süden her langsam mit Schottern und Sanden aufgefüllt, während im Norden anfangs die Seetonablagerung noch anhielt. In 20–40 m Teufe fanden sich in einigen Aufschlußbohrungen (E/1, E/2, D/2, A/1, A/2, 17/1) Moränenmaterial, Lehm, Findlinge und Nagelfluh, was darauf hindeutet, daß der Gletscher schließlich über die jungen Sedimente hinwegging und sie teilweise erodierte.

Nach dem Rückgang der Hauptvereisung lag während des Penckschen Bühl-Stadiums noch eine Gletscherzunge bei Eschenlohe (C. W. Kockel–M. Richter–H. G. Steinmann, 1931). Während dieser Zeit war das Garmischer Becken noch bis ca. 850 m mit Eis gefüllt. In diese Zeit sind die Ufermoränen zwischen Garmisch und Farchant am westlichen Talrand zu stellen.

Auch F. Levy (1920) nimmt an, daß in seinem – dem Bühlstadium Pencks entsprechenden–Krünnstadium, das Ende des Loisachgletschers bei Eschenlohe lag. Endmoränenwälle dieser Gletscherzunge stauten erneut einen See auf. Der stauende Wall wurde zeitweise durchbrochen, zeitweilig durch Schuttmassen wieder erhöht. Dadurch wechselten Sedimentation und Erosion. Es kam daher nur noch stellenweise zur Ausbildung einer geschlossenen Seetondecke (s. Abb. 17.).

Im Postglazial und Holozän ergossen sich mächtige Schuttkegel ins Tal. Flußschotter breiteten sich über den Talboden aus und in kleinen Restseen lagerte sich Seeton ab. In den verlandenden Seen bildeten sich Moore.

Der Aufbau der Talauffüllung wurde durch eine besondere Darstellungsweise erfaßt (Abb. 17, 18, 19), indem sie bis zu einer Teufe von 150 m in sechs horizontalliegende Schichtpakete zerlegt wurde. Diese Schichtpakete wurden in der jeweiligen Tiefe so gelegt, daß sie vor allem Auskunft über die Verbreitung des Seetons gaben. Für jedes Schichtpaket wurden Bohrergebnisse und seismische Messungen wiedergegeben.

Abb. 17 oben und unten gibt den Zustand der Talfüllung während des Seestadiums wieder, wie er wahrscheinlich zur Zeit des Frühwürm vorlag. Eine genaue zeitliche Festlegung ist jedoch nicht möglich. Der Talquerschnitt in der Teufe von 70–150 m ist noch gering, bei Oberau beträgt er etwa 500 m. Eine Ausbuchtung westlich von Oberau, wie sie im heutigen Loisachtal vorhanden ist, besteht noch nicht. Deutlich erkennbar ist ein Umbiegen des Tales bei Eschenlohe nach NW. Fast von Farchant bis beinahe nach Eschenlohe zieht ein geschlossener Seetonkörper, der in einem frühwürmeiszeitlichen See abgelagert worden sein dürfte.

Abb. 18 oben (Teufe 50–70 m) läßt die zunehmende Verbreiterung des Tales erkennen. Der See wird langsam von Süden her, während der Vorrückphase des Würmgletschers, mit Sanden und Kiesen aufgefüllt. Im N hält die Seetonablagerung noch an. Dadurch steigt die Oberfläche des Seetons im Längsprofil (Abb. 13) nach N an.

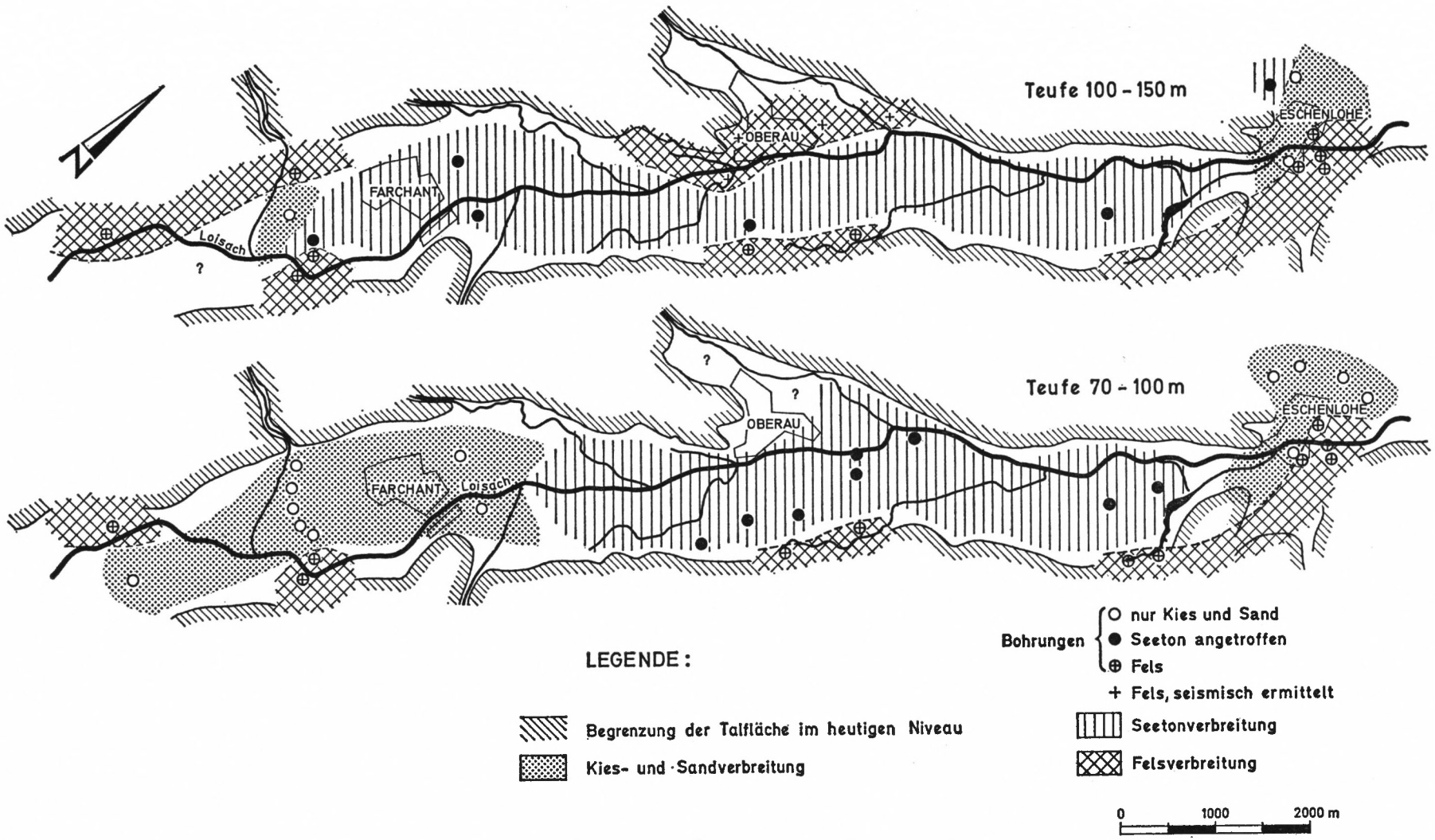


Abb. 17: Darstellung der Talauffüllung in Schichtpaketen; Teufen: 100–150 m und 70–100 m

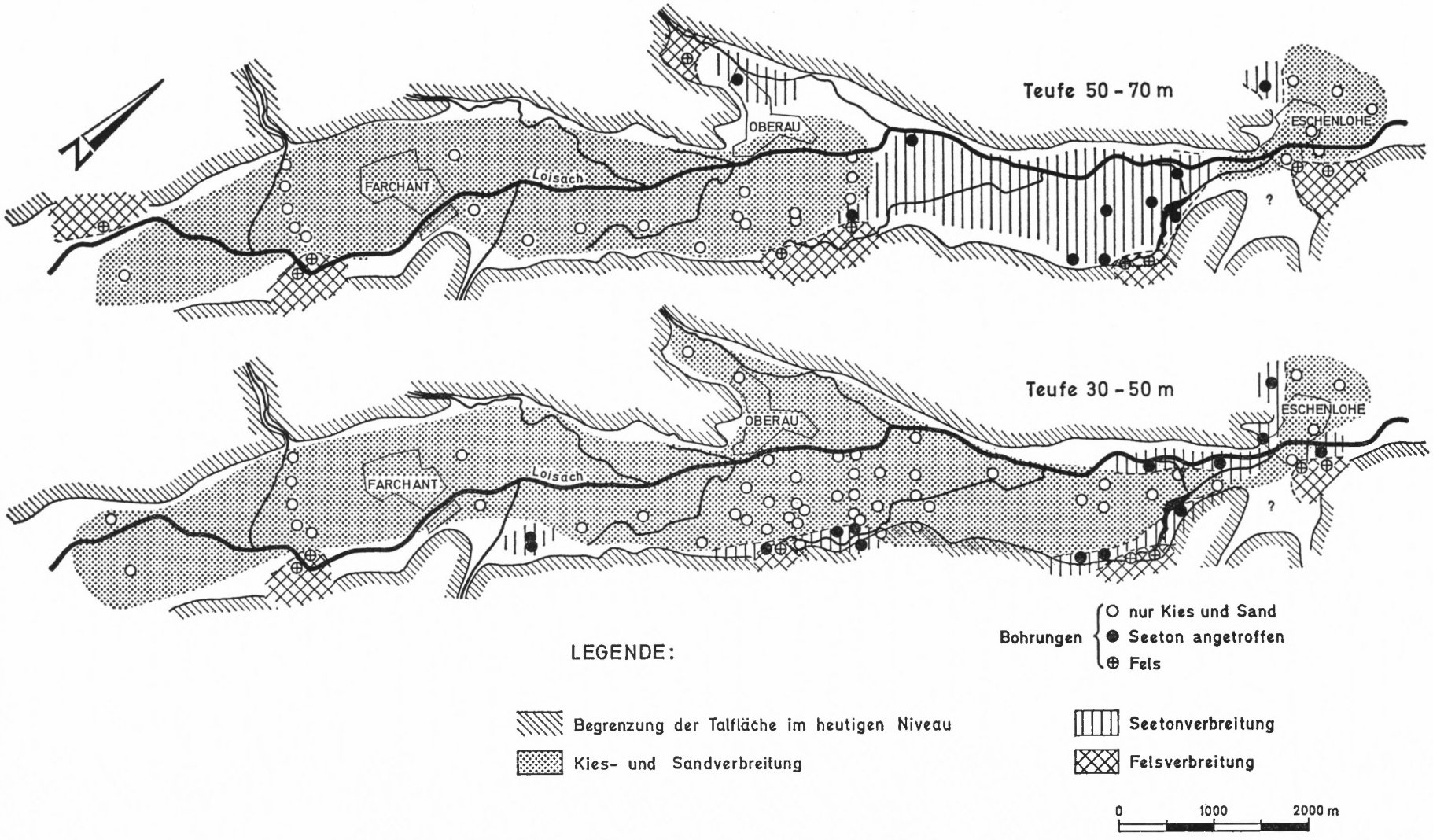


Abb. 18: Darstellung der Talfüllung in Schichtpaketen; Teufen: 50–70 m und 30–50 m

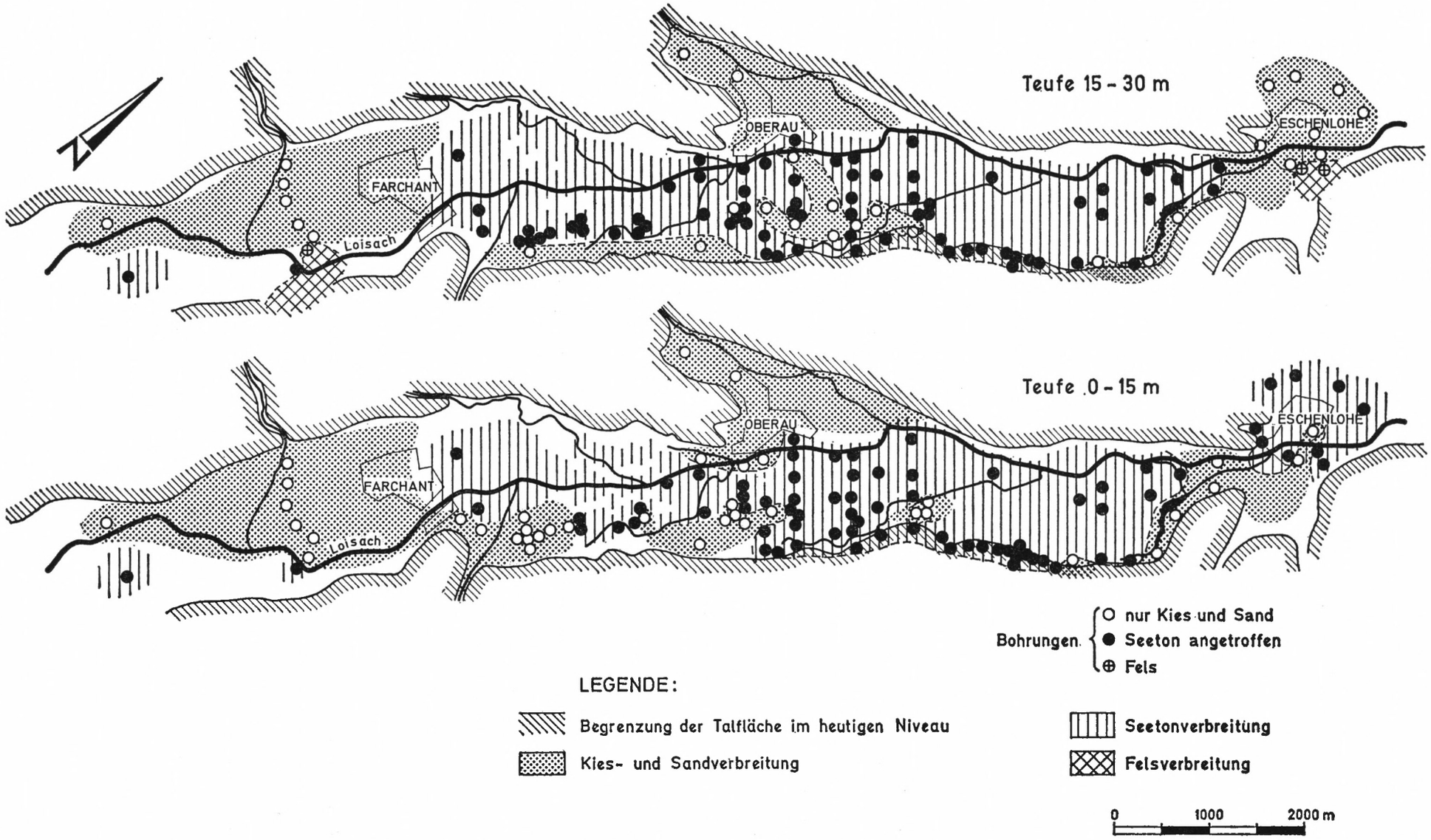


Abb. 19: Darstellung der Talauffüllung in Schichtpaketen; Teufen: 15–30 m und 0–15 m

Abb. 18 unten (Teufe 30–50 m): Über die Eschenloher Enge hinweg ist eine Verbindung zwischen Oberauer- und Murnauer See eingetreten. Der ursprünglich mehrere Zehner km lange Oberauer See besteht jetzt nur noch aus kleinen Randseen. Die Schuttmassen von Eschenlaine und Archtallaine drängen den See bei Eschenlohe nach Westen.

Abb. 19 oben und unten (Teufe 15–30 m und 0–15 m): Die Situation hat sich völlig gewandelt. Auf weiten Flächen wird wieder Seeton sedimentiert. Die Seetone sind reich an Pflanzenresten. Das deutet darauf hin, daß es sich hier um postglaziale, sehr junge Bildungen handelt. Geoelektrische Untersuchungen des Amtes für Bodenforschung, Hannover (1953), haben Moränenwälle auf Höhe der Mühlbachquellen südlich Eschenlohe nachgewiesen. Diese Moränenwälle stauten nach Rückzug des Eises erneut einen See auf. Zur Ausbildung einer zusammenhängenden Seetondecke kam es, wie die Abb. 19 oben und unten und die geologischen Querprofile (Abb. 14 und 15) zeigen, nicht.

Der stauende Moränenwall bei Eschenlohe wurde zeitweise durchbrochen, später durch kräftige Schuttzufuhr von Archtallaine und Eschenlaine wieder erhöht. So wechselten Sedimentation und Erosion, und es kam zur Ausbildung zahlreicher in Schotter eingelagerter Seetonkörper. Möglicherweise hat auch ein kurzzeitiger, schwacher Gletschervorstoß noch seinen Teil zur Umgestaltung der Talfüllung beigetragen. Weitere Rückzugsmoränenwälle dürften der Anlaß für isolierte Seetonablagerungen südlich Farchant sein.

Glazialer Entstehung ist auch der Sattel zwischen Oberau und Ettal, aus dem die Maulenbachquellen entspringen. Interglazial mündete das Tal der Ammer bei Oberau ins Loisachtal. Der herannahende Loisachgletscher verbaute diesen Talausgang der Ammer. Die abgeriegelte Schlucht wurde mit Schottern, weiter oben mit Bändertonen und schließlich durch feinere Lokalschotter aufgefüllt (Kockel–Richter–Steinmann, 1931). Darüber lagern sich Schotter und Moränen mit kristallinen Geschieben. Sie bilden die etwa 880 m hohe Talwasserscheide zwischen Ammer und Loisach. Die Wasserscheide ist jedoch nur teilweise wirksam, da die Maulenbachquellen ihr Wasser unterirdisch durch die durchlässigen Schotter aus dem Einzugsgebiet der Ammer beziehen (vgl. S. 21).

4.2. Grundwasserverhältnisse

Zahlreiche Aufschlußbohrungen, die teilweise bis zu einer Teufe von 165 m vorgetrieben wurden, zeigen, daß im größten Teil des Loisachtales zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe bis zu dieser Teufe zwei Grundwasserstockwerke vorhanden sind. Die weitgehende Trennung der Grundwasserstockwerke beginnt im Süden bei Farchant und reicht im Norden bis Eschenlohe. Das zweite Grundwasserstockwerk ist gespannt.

4.2.1. Das erste Grundwasserstockwerk

Im Talbereich zwischen Garmisch-Partenkirchen und Farchant fließt ein Grundwasserstrom mit freiem Grundwasserspiegel. Von Farchant bis Eschenlohe bewirkt eine bis zu 20 m mächtige Seetondecke eine Stockwerkstrennung in ein erstes und ein zweites Grundwasserstockwerk. Der Flurabstand der Grundwasseroberfläche des ersten Grundwasserstockwerkes beträgt bei MW (10. 1. 1966) in Garmisch-Partenkirchen etwa 25 m (Meßstelle F/1), bei Meßstelle E/1 etwa 13 m und bei Meßstelle 1/RP5, wo bereits die Stockwerkstrennung besteht, 1,3 m. Zwischen Oberau und Eschenlohe liegt die Grundwasseroberfläche nahe an der Geländeoberfläche. Die Grundwassermächtigkeit beträgt im ersten

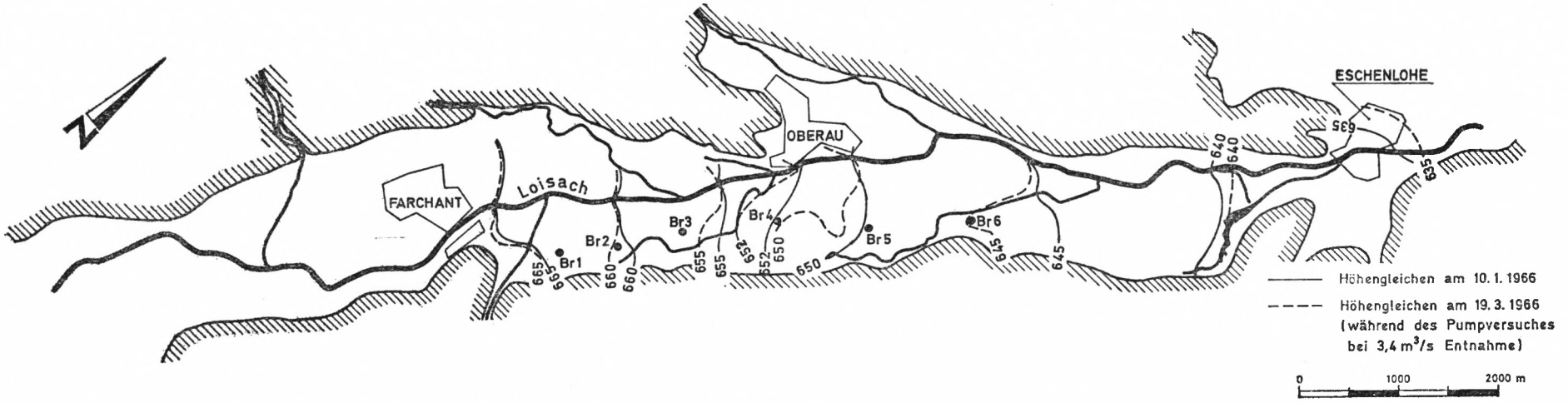


Abb. 20: Höhengleichen des Grundwasserspiegels im 1. Stockwerk

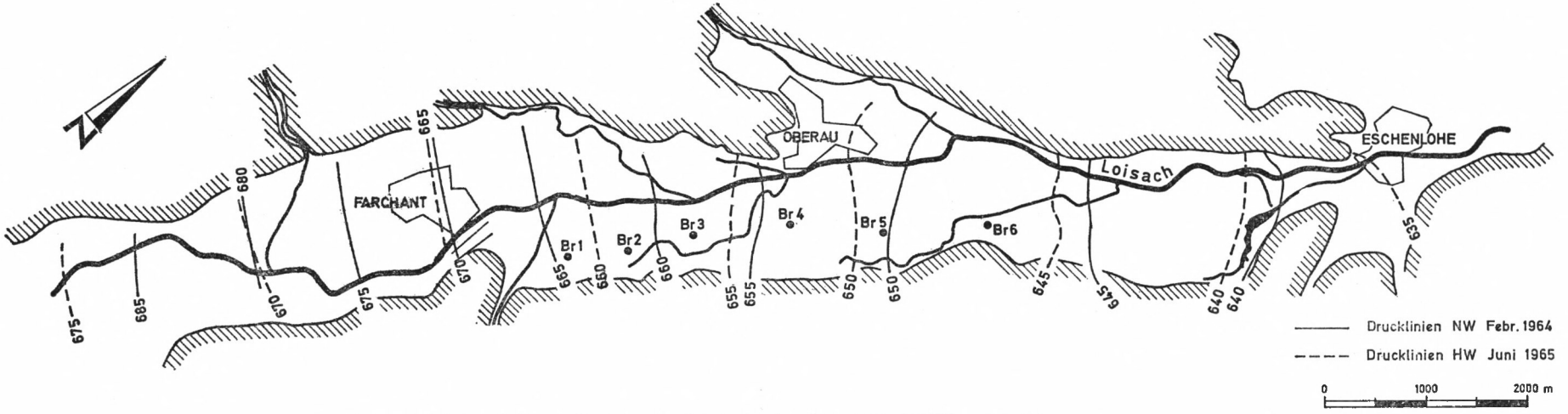


Abb. 21: Höhengleichen des Druckspiegels (2. Stockwerk) bei NW und HW.

Grundwasserstockwerk bei MW durchschnittlich 8–10 m; an einigen Stellen erreicht sie jedoch bis zu 25 m.

Die Grundwasserhöhengleichen im ersten Stockwerk verlaufen im wesentlichen senkrecht zur Talrichtung, zeigen aber eine deutliche Beeinflussung durch die Vorfluter. In der Nähe der Loisach und der Bäche herrscht meist ein Gefälle zu den Vorflutern hin. Lediglich im Bereich von Oberau tritt ein Gefälle von der Loisach zu den Talrändern auf. Hier liegt die Loisachsohle ziemlich hoch und der Fluß speist in das erste Grundwasserstockwerk ein (Abb. 20).

In Abb. 20 mußte der Verlauf der Grundwasserhöhengleichen im ersten Stockwerk bei mittleren Wasserständen dargestellt werden, da für NW und HW zu wenige Beobachtungen vorliegen. Es wurde dazu das Bild der Grundwasserhöhengleichen während des Beharrungszustandes beim Großpumpversuch 1966 bei einer Entnahme von 3400 l/s mitaufgenommen.

Während des Großpumpversuches, bei dem aus dem zweiten Grundwasserstockwerk entnommen wurde, wichen die Grundwasserhöhengleichen im ersten Stockwerk in der Nähe der Brunnen 1-3 und am östlichen Talrand deutlich zurück, während im Norden ein Anstieg der Grundwasseroberfläche festzustellen war. Bei Oberau hatte sich die Einspeisung von Loisachwasser in das erste Grundwasserstockwerk verstärkt.

Südlich Oberau beträgt das Gefälle des ersten Grundwasserstockwerkes zwischen 3 und $8‰$. Von Oberau bis zur Enge bei Eschenlohe liegt es etwa gleichbleibend bei $2{,}5‰$. Im Raum von Eschenlohe treten wieder Schwankungen von $2–6‰$ auf (s. Beilage 2).

4.2.2. Das zweite Grundwasserstockwerk

Der Grundwasserstrom zwischen Garmisch-Partenkirchen und Farchant wird in den weiteren Betrachtungen trotz seines freien Spiegels mit dem zweiten Grundwasserstockwerk zusammengefaßt, da er dieses im wesentlichen speist.

Das zweite Grundwasserstockwerk ruht auf einer ausgedehnten, stauenden Seetonsohle von unbekannter Mächtigkeit und wird von einer teilweise geschlossenen Seetondecke überlagert. Die Mächtigkeit des zweiten Stockwerkes verringert sich von Süden nach Norden. Sie beträgt bei Farchant etwa 75 m und nimmt bis auf etwa 20 m (bei 18/3) ab.

Das Wasser im zweiten Grundwasserstockwerk steht unter Druck. Die Grundwasserhöhengleichen des Druckspiegels verlaufen senkrecht zur Talrichtung (Abb. 21) und verschieben sich bei NW talaufwärts, ohne dabei ihren Verlauf wesentlich zu ändern. Das Gefälle liegt bei NW zwischen 2,4 und $4{,}3‰$ (s. Abb. 24), bei HW zwischen 3,2 und $5{,}2‰$.

Die Spiegelschwankungen im zweiten Grundwasserstockwerk zwischen HW und NW verringern sich von S nach N. Die Amplituden betragen im Süden bei Garmisch-Partenkirchen etwa 15 m im Norden, zwischen Lauterbach und Mühlbach nur noch 0,5 m (s. Abb. 22). Der Druckspiegel des zweiten Grundwasserstockwerkes liegt in einigen Bereichen selbst bei NW über der Geländeoberkante (s. Abb. 23). Die Sohlen von Ronetsbach, Lauterbach, Mühlbach und eines großen Teiles der Loisach liegen bei NW unter dem Druckspiegel. Bei HW steigt der Druckspiegel im größten Teil des Talbereiches zwischen Oberau und Eschenlohe über die Geländeoberkante, ebenso in einem Teil des Gebietes zwischen Farchant und Oberau (Abb. 23). In diesen Gebieten tritt bei entsprechenden Druckspiegelhöhen dort Wasser aus dem zweiten Stockwerk an die Oberfläche, wo die trennende Seetondecke durchbrochen ist. Das lassen die Grundwasseraufstöße erkennen, die alle in den genannten Gebieten liegen.

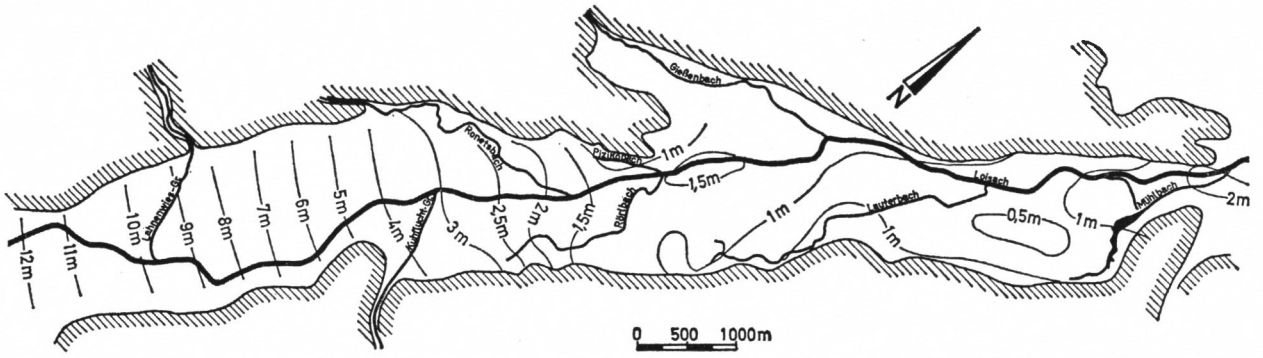


Abb. 22: Schwankungen des Druckspiegels (2. Stockwerk) zwischen NW Februar 1964 und HW Juni 1965.

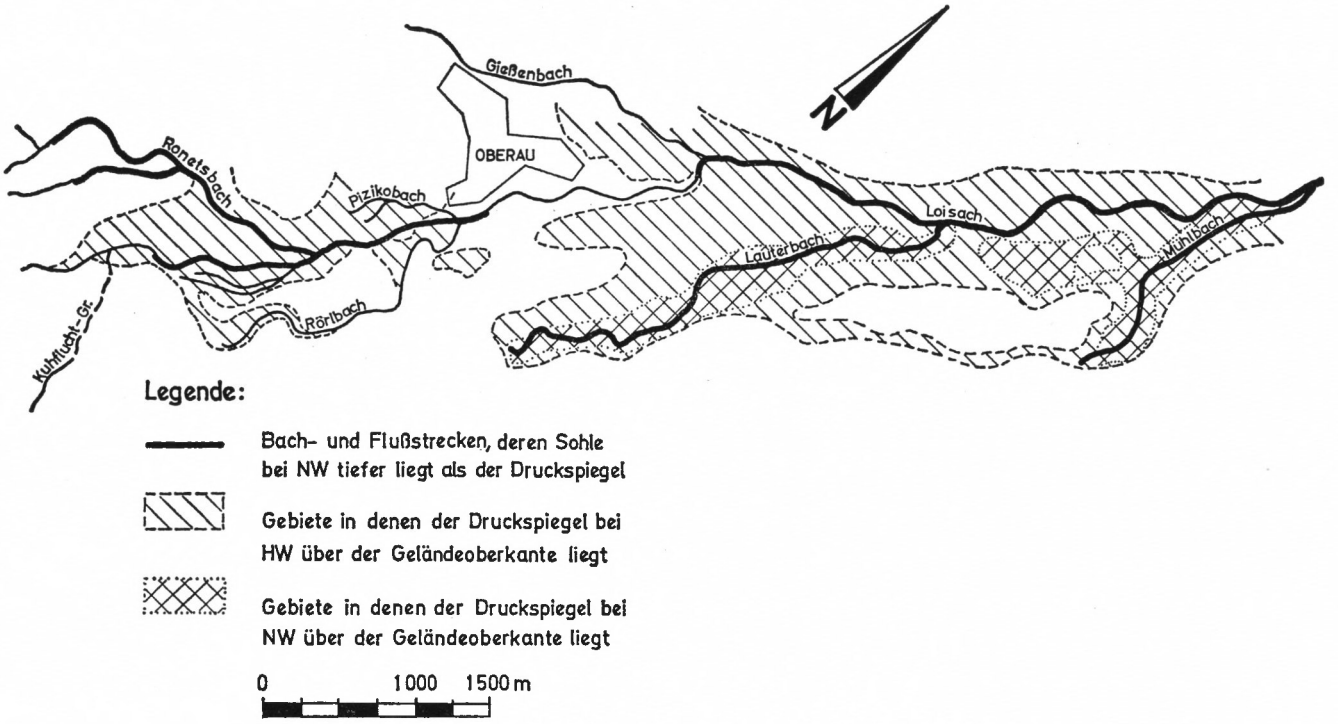


Abb. 23: Druckspiegel (2. Stockwerk) und Geländeoberkante.

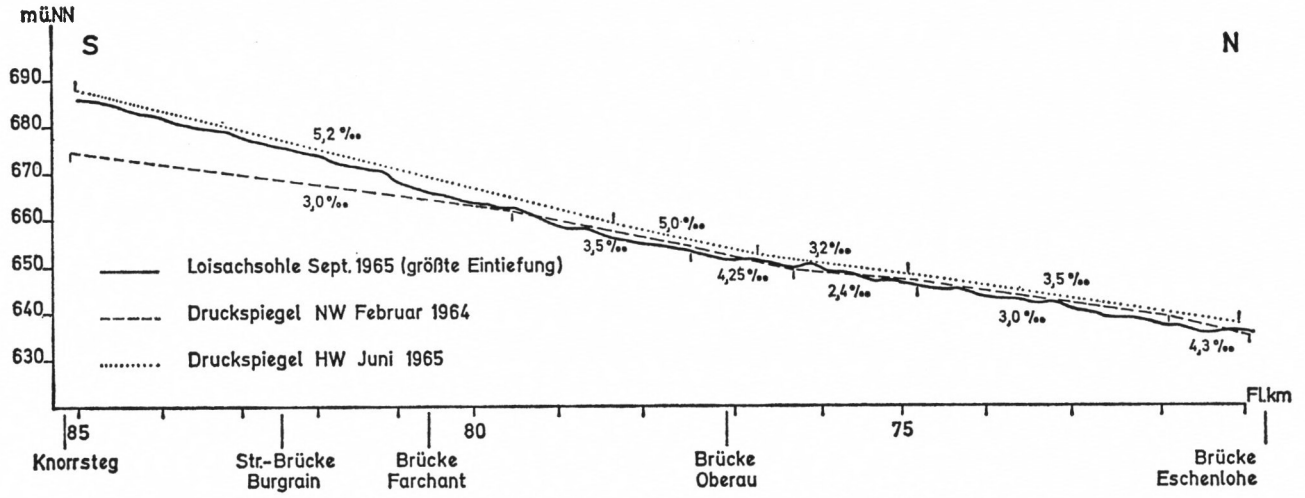


Abb. 24: NW- und HW-Druckspiegel (2. Stockwerk) und Loisachsohle.

Während des HW im Juni 1965 lag der Druckspiegel bzw. die Grundwasseroberfläche des zweiten Stockwerkes auf der gesamten Strecke zwischen Garmisch–Knorrsteg und Eschenlohe über der Loisachsohle (Abb. 24. Zu dieser Darstellung wurden Messungen des Wasserwirtschaftsamtes Weilheim verwendet, wobei jeweils die größte Eintiefung der Sohle in einem Loisachquerprofil herangezogen wurde).

Während des NW im Februar 1964 lag der Druckspiegel bzw. die Grundwasseroberfläche des zweiten Stockwerkes von Garmisch-Knorrsteg bis Farchant unter der Loisachsohle, um dann bis Eschenlohe mit einer kurzen Unterbrechung bei Oberau, über der Loisachsohle zu liegen. Das bedeutet, daß die Loisach, selbst bei NW, Grundwasser aus dem zweiten Stockwerk aufnehmen kann, sofern Verbindungswege vorhanden sind. Daß dies der Fall ist, wird später mit Reihenabflußmessungen nachgewiesen werden (s. Tab. 15).

4.2.3. Ganglinienvergleiche

Die Ganglinien der Loisachpegel von Garmisch-Knorrsteg bis Eschenlohe weisen kaum Verschiedenheiten auf (Abb. 25 und 26). Die Sommermonate sind gekennzeichnet durch höhere Wasserstände und zahlreiche, teilweise kräftige Maxima. Die Wintermonate dagegen zeichnen sich durch niedrige Wasserstände ohne nennenswerte Schwankungen aus. Das bedeutet, daß der Abfluß im Winter zum größten Teil aus Grundwasser besteht. Das Wettergeschehen macht sich an den Loisachpegeln mit höchstens einem Tag Verzögerung bemerkbar.

Die Grundwasserstandsganglinien weisen dagegen untereinander deutliche Unterschiede auf. Zum einen verlaufen die Ganglinien im ersten Stockwerk teilweise anders als die im zweiten Stockwerk, zum anderen verhalten sich die südlichen anders als die nördlichen. Das Wettergeschehen wirkt sich an den Grundwassermeßstellen unterschiedlich aus. Selbst einzelne Pegel reagieren je nach Niederschlagshöhe und Grundwasserstand verschieden.

Die Loisach verliert zeitweise einen Teil ihres Abflusses ins Grundwasser. Es machen sich daher starke Hochwässer, oder kurzzeitige Erhöhungen während Niederwasserzeiten als Infiltration von der Loisach ins Grundwasser schneller bemerkbar als der Anstieg des Grundwassers aus der Versickerung von Niederschlägen.

An der Grundwassermeßstelle E/1 zwischen Garmisch-Partenkirchen und Burgrain machen sich die hohen Niederschläge von Ende Mai und Anfang Juni 1965 in der Ganglinie erst Ende Juni bis Anfang Juli, nach etwa einem Monat als Maximum bemerkbar. Die relativ trockene Periode Mitte August 1965 erscheint etwa 35 Tage später – gegen Ende September – als Tiefpunkt in der Ganglinie. Die nachfolgenden Regenfälle von Ende August bis Mitte September spiegeln sich einen Monat später als Hochpunkt wieder.

An der Grundwassermeßstelle E/1 scheint das Grundwasser also mit etwa einem Monat Verzögerung auf das Wettergeschehen zu reagieren.

Mitte November 1964 kam es zu starken Niederschlägen, die die Loisach kräftig ansteigen ließen. Das Grundwasser zeigte bereits 12 Tage später einen Höchststand. Das Tauwetter und die Regenfälle Mitte Dezember 1965 führten, nach einer längeren Periode mit fallendem Grundwasser, bereits nach 8–10 Tagen zu einem neuen Maximum der Ganglinie von E/1. Es liegt die Vermutung nahe, daß sich hier die Versickerung von Loisachwasser ins Grundwasser abzeichnet.

Am Pegel D/1 machen sich die Mai/Juni-Niederschläge des Jahres 1965 10 Tage eher bemerkbar als am Pegel E/1, am Pegel C/1 sogar 20 Tage eher. Die hohen Novembernieder-schläge von 1964 zeigen sich bei D/1 nach 7 Tagen, bei C/1 nach 5 Tagen.

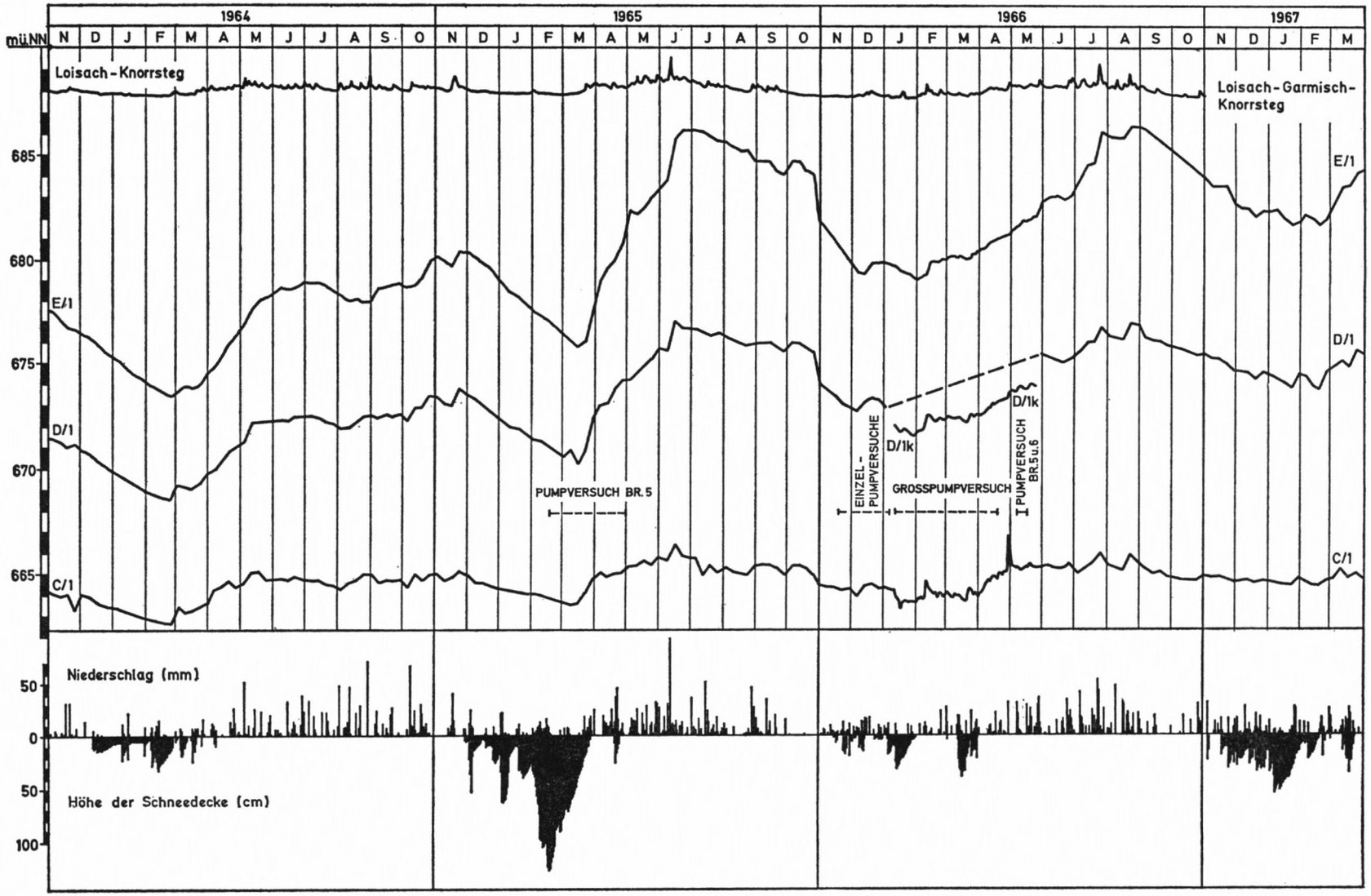


Abb. 25: Ganglinien der Grundwassermeßstellen E/1, D/1 (D/1k), C/1 und der Loisach am Pegel Garmisch-Knorrsteg mit den dazugehörigen Werten des Niederschlags und der Höhe der Schneedecke für die Niederschlagsmeßstelle Oberau.

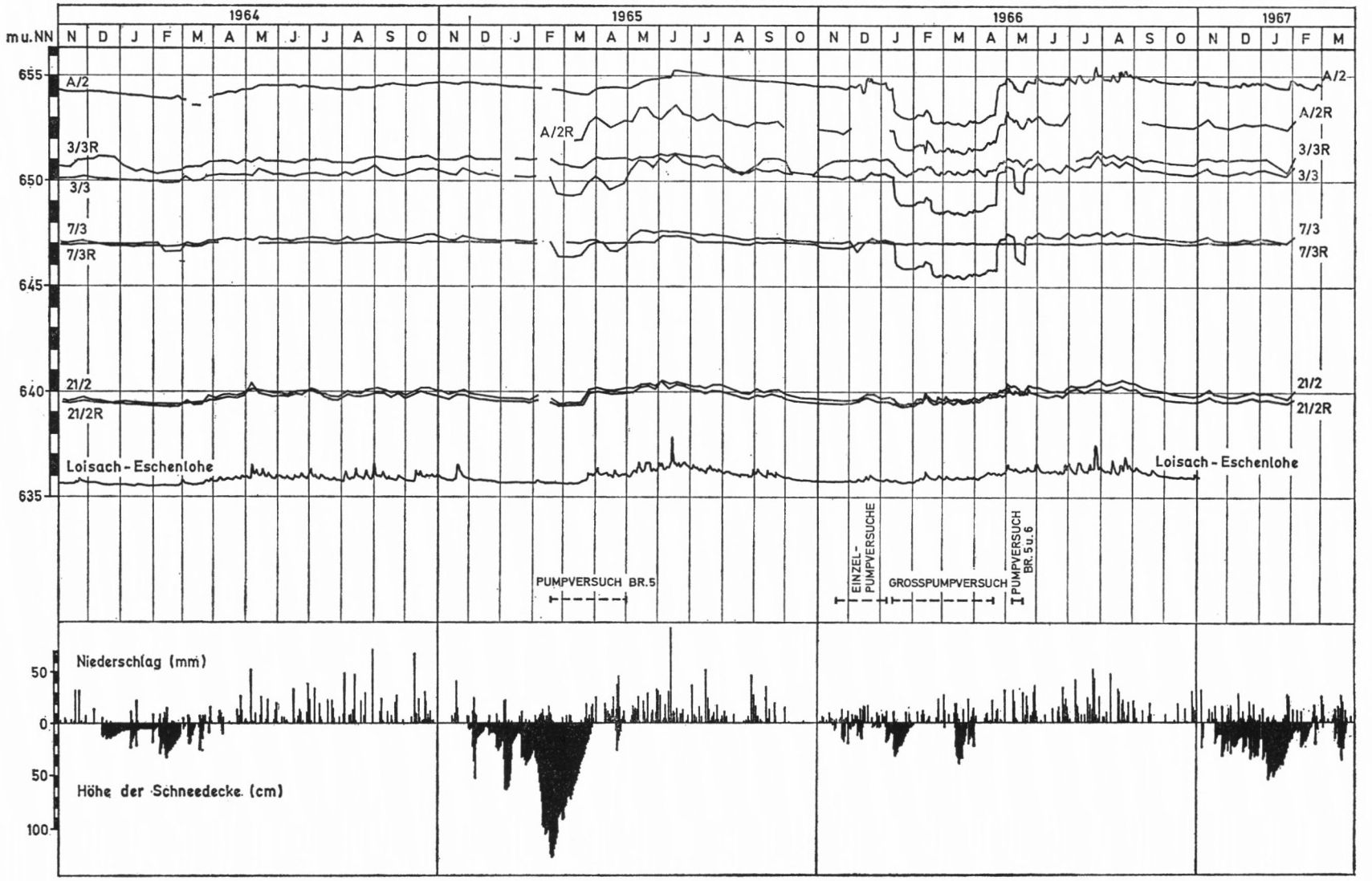


Abb. 26: Ganglinien von Grundwassermeßstellen zwischen Oberau und Eschenlohe und der Loisach am Pegel Eschenlohe mit den dazugehörigen Werten des Niederschlags und der Höhe der Schneedecke für die Niederschlagsmeßstelle Oberau.

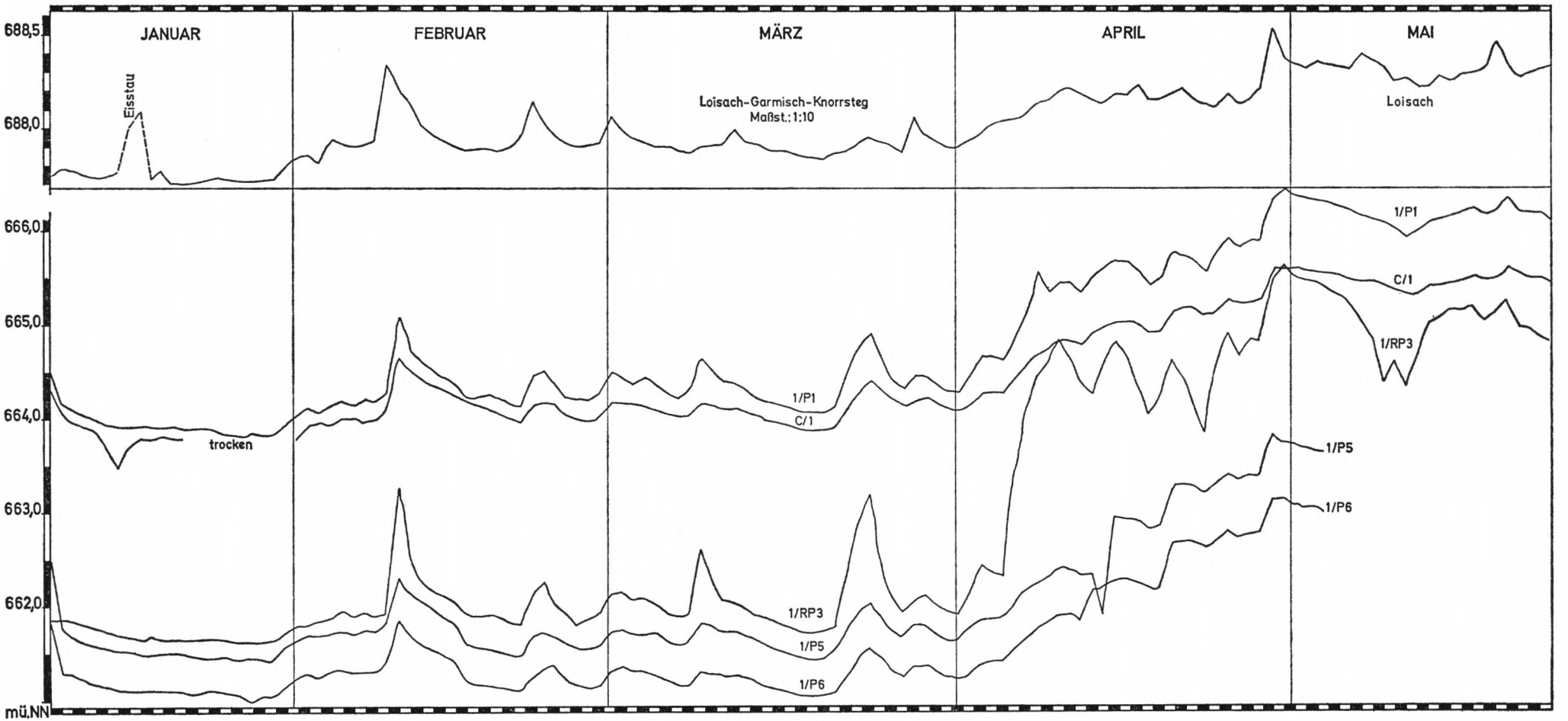


Abb. 27: Ganglinien von Grundwassermeßstellen bei Brunnen 1 und der Loisach während des Großpumpversuches 1966.

Die August/September-Regenfälle im Jahr 1965 dagen führen bei D/1 und C/1 jeweils erst nach etwa einem Monat zu Erhöhungen des Grundwassers. Das Tauwetter und der Regen im Dezember 1965 hingegen zeichnen sich bei D/1 und C/1 bereits nach 2 bis 3 Tagen ab.

Die Verschiedenartigkeit des Verhaltens der Ganglinien auf das Wettergeschehen bedeutet, daß das Grundwasser im wesentlichen im Schwankungsregime mit den Vorflutern steht und weniger durch flächenhafte Versickerung von Niederschlägen beeinflußt wird.

Alle Grundwassermeßstellen nördlich von Farchant lassen nur schwer einen verzögerten Einfluß des Wettergeschehens erkennen; denn in nahezu allen Meßstellen im zweiten und vielen im ersten Grundwasserstockwerk macht sich der Einfluß der Loisach durch hohe Druckmaxima der Wasserstände bemerkbar. In der Nähe des Kuhfluchtgrabens zeigt sich eine Beeinflussung durch seine Wasserführung.

Der Kuhfluchtgraben hatte nach Beginn der Schneeschmelze im März 1966 zeitweise eine sehr hohe Wasserführung. Seine Wässer erreichten die Loisach jedoch nicht, da sie vorher im Schuttkegel des Baches versickerten. Diese Versickerungen dürften der Anlaß für den starken Anstieg der Ganglinien, vor allem im ersten Grundwasserstockwerk (z. B. Meßstelle 1/RP3) in der Umgebung des Brunnens 1 sein. Auch die Meßstellen im zweiten Grundwasserstockwerk, wie C/1 und 1/P1, lassen, wie ein Vergleich mit der Ganglinie der Meßstelle 1/RP3 zeigt, noch eine deutliche Beeinflussung durch Versickerungen aus dem Kuhfluchtgraben erkennen (s. Abb. 27). Die Meßstelle 1/P1, die am stärksten beeinflußt ist, liegt etwa 200 m südlich des Kuhfluchtgrabens. In ihrer Nähe müssen Verbindungen zwischen den beiden Grundwasserstockwerken bestehen.

Die Ganglinien der Meßstellen im ersten Grundwasserstockwerk laufen häufig parallel zu jenen der Meßstellen im zweiten Stockwerk, jedoch meist etwas gedämpft. Nicht parallel zu den Ganglinien im zweiten Stockwerk laufen die der Meßstellen 5/RP3, 4/DKR, 3/3R, 6/R1, 7/RP1, 7/3R, 10/3R, 18/3R und 28/2R im ersten Grundwasserstockwerk, außerdem die in der Nähe des Kuhfluchtgrabens gelegenen Rammpegel. Alle anderen Meßstellen werden indirekt durch das zweite Stockwerk beeinflußt.

Die Amplituden der Ganglinien des Grundwassers im zweiten Grundwasserstockwerk werden von Süden nach Norden geringer. Es ist der Einfluß der Druckentlastung durch Quellaufstöße, der eine Dämpfung hervorruft. Die Schwankungen des Abflusses im zweiten Stockwerk nehmen daher ebenfalls von Süden nach Norden ab.

4.2.4. Pumpversuche

4.2.4.1. Auswirkungen der Pumpversuche in den beiden Grundwasserstockwerken

Von den Wasserwerken der Landeshauptstadt München wurden im Gebiet zwischen Farchant und Eschenlohe mehrere Pumpversuche durchgeführt. Vom 19. 8. bis 4. 10. 1954 fand ein Pumpversuch an einem Versuchsbrunnen bei Gut Buchwies, vom 14. 12. bis 21. 12. 1956 ein Pumpversuch am Brunnen 3K und vom 15. 2. bis 30. 4. 1965 ein Einzelpumpversuch am Versuchsbrunnen 5 statt. Weitere Einzelpumpversuche erfolgten:

am Brunnen 1 vom 1. 12. bis 10. 12. 1965
am Brunnen 2 vom 4. 1. bis 7. 1. 1966
am Brunnen 3 vom 18. 11. bis 25. 11. 1965
am Brunnen 4 vom 10. 12. bis 14. 12. 1965
am Brunnen 6 vom 29. 11. bis 7. 12. 1965

Ein Großpumpversuch mit allen sechs Brunnen fand vom 10. 1. 1966 bis 19. 4. 1966 statt.

Im Rahmen eines Färbeversuches lief ein weiterer Pumpversuch an den Brunnen 5 und 6 in der Zeit vom 6. 5. bis 16. 5. 1966.

Alle Pumpversuche wurden bei mittleren Grundwasserständen durchgeführt, so daß sich ihre Ergebnisse nahezu deckten. Es wird daher im wesentlichen auf den Großpumpversuch zu Beginn des Jahres 1966 eingegangen.

Während des Großpumpversuches wurden vom 10. 1. bis 15. 2. 1966 2500 l/s und vom 15. 2. bis 19. 4. 1966 3400 l/s aus dem unteren, gespannten Grundwasserstockwerk gefördert. Brunnen 1, 2, 3, 4, und 6 stellen Vertikalfilterbrunnen, Brunnen 5 einen Horizontalfilterbrunnen mit einem Radius von 50 m dar.

Die Druckentlastungstrichter waren relativ zur Entnahmemenge gering. Die Entnahmebreiten lagen bei 200–300 m.

Eine Auswirkung auf das zweite Grundwasserstockwerk war im Süden bis in das Gebiet von Farchant, 1,5–2 km südlich Brunnen 1 (das D-Profil wurde nicht mehr beeinflußt), im Norden etwa bis Pegel 23/2, das ist etwa 3–3,5 km nördlich Brunnen 6, festzustellen. Der Druckspiegel im gesamten Gebiet zwischen den Brunnen 1 und 6 wurde bei 3,4 m^3/s Entnahmemenge bis an die Talränder um etwa 1–2 m abgesenkt. In den Entnahmetrichtern um die Brunnen war, wie die graphische Auftragung der Grundwasserabsenkung zeigte, die Absenkung natürlich größer. An den zwischen den Brunnen oder an den Talrändern gelegenen Pegeln kam es z. B. zu folgenden Absenkungen:

B/1:	s = 1,47
A/1:	s = 1,66
1/1:	s = 1,58
3/1:	s = 2,04
6/2:	s = 1,98

An den Brunnen 1–6 traten bei der Entnahme von 3,4 m^3/s Absenkungen zwischen 2,62 m und 4,30 m auf. Es handelt sich hierbei um relative Absenkungen. Die absoluten Werte wären höher gewesen, da der unbeeinflußte Grundwasserspiegel inzwischen angestiegen war, wie die Ganglinie der Meßstelle E/1 in Abb. 25 zeigt. Die absolute Absenkung für die Meßstelle 1/1 hätte z. B. etwa 1,80 m betragen.

Das erste Grundwasserstockwerk reagierte zum großen Teil ebenfalls auf die Entnahme aus dem zweiten Stockwerk. Wie Beilage 3 zeigt, traten während des Großpumpversuches zu Beginn des Jahres 1966 auch im ersten Grundwasserstockwerk Absenkungen bis etwa 1,5 m auf. Auffällig ist, daß die Absenkung zu den Talrändern hin meist stärker war. Das ist damit zu erklären, daß die Seetondecke an den Talrändern auskeilt (Abb. 14) und hier eine enge Verbindung zwischen erstem und zweitem Grundwasserstockwerk besteht.

Im Bereich von Brunnen 1 machte sich der Einfluß des Kuhfluchtgrabens im ersten Grundwasserstockwerk dadurch bemerkbar, daß die maximalen Absenkungen geringer waren und nicht am 19. 3. 1966 lagen, wie bei den meisten anderen Pegeln. Zwischen Brunnen 5 und 6 und der Loisach liegt ein Gebiet, in dem sich keine Auswirkungen des Pumpversuches auf das erste Grundwasserstockwerk zeigten. Teilweise war sogar ein Anstieg der Grundwasseroberfläche eingetreten (Beilage 3). Hier dichtet eine geschlossene Seetondecke das erste gegen das zweite Stockwerk ab. Die relativ starke Absenkung am Pegel 3/RP3 deutet dagegen darauf hin, daß die Seetondecke in Nähe des Pegels durchbrochen ist.

4.2.4.2. Auswirkungen des Großpumpversuches 1966 an Vorflutern

Durch den Pumpversuch wurden alle Bäche beeinflußt, die aus Quellaufstößen im Talgrund gespeist werden und die über längere Strecken im Tal dahinfließen.

Der Ursprungsbach in Nähe der Brunnen 2 und 3 fiel bereits 24 Stunden nach Beginn des Pumpversuches trocken. Die Wasserführung des Ronetsbaches verringerte sich etwa auf die Hälfte. Der Pizikobach fiel als Auswirkung des Pumpversuches zeitweise trocken. Der Rörlbach lag bereits 30 Stunden nach Beginn des Pumpversuches trocken. Während der Schneeschmelze führte er abschnittsweise Wasser. Der Pöttinger-Weiher-Bach in Oberau, der Abflußmengen zwischen 50 und 90 l/s bringt, fiel in seinem Oberlauf trocken. Die Wasserführung des Lauterbaches verringerte sich bei der Entnahme von 3400 l/s auf etwa $^1/_5$. Der Mühlbach büßte durch den Pumpversuch etwa $^1/_3$ seiner Wasserführung ein.

Aus dem Ansprechen der Bäche auf den Pumpversuch ist ersichtlich, daß sie im wesentlichen aus dem zweiten Grundwasserstockwerk gespeist werden. Eine Beeinflussung der Loisach oder der Bäche im Eschenloher Moos konnte nicht festgestellt werden.

4.2.4.3. Durchlässigkeitsbeiwerte

Während der Einzelpumpversuche Ende 1965, Anfang 1966 an den Brunnen 1–6 wurden von den Wasserwerken der Landeshauptstadt München k-Werte nach der dynamischen Brunnentheorie von C. v. Theis im gespannten Grundwasser bestimmt.

Es ergaben sich für die einzelnen Brunnen folgende mittlere k-Werte:

Brunnen 1:	0,019	(m/s)
Brunnen 2:	0,023	(m/s)
Brunnen 3:	0,0225	(m/s)
Brunnen 4:	0,0218	(m/s)
Brunnen 5:	0,0167	(m/s)
Brunnen 6:	0,022	(m/s)

Die Werte für die einzelnen Pegel lagen bei der Absenkung zwischen 0,015 und 0,027 m/s, für den Anstieg zwischen 0,013 und 0,030 m/s.

4.3. Chemische Wasseruntersuchungen

4.3.1. Chemische Wasseruntersuchungen an Grundwassermeßstellen

a) Im ersten Grundwasserstockwerk

Das erste Grundwasserstockwerk führt schwach saure bis schwach alkalische Wässer. Saure Wässer treten in Sumpfgebieten mit im wesentlichen stagnierenden Wässern auf, wie am Brunnen 3, am Brunnen 5 und in den Sumpfgebieten zwischen Oberau und Eschenlohe. Es zeigen sich geringe Eisen- und Mangangehalte. Der $KMnO_4$-Verbrauch ist aufgrund der vielen organischen Beimengungen groß und reicht bis 30 mg/l.

Schwach alkalische Wässer mit einem Chemismus, ähnlich, wie der der Wässer im zweiten Stockwerk, treten in Gebieten mit fließendem Grundwasser auf. Zu einem Teil stammen sie aus dem tieferen Grundwasserstockwerk.

Die Gesamthärte der Wässer im ersten Grundwasserstockwerk liegt zwischen 10,5 und 15 °DH, die Karbonathärte zwischen 9,5 und 14,5 °DH. Der einzige wesentliche Unterschied im Vergleich zu den alkalischen Wässern des zweiten Stockwerkes besteht in dem

höheren $KMnO_4$-Verbrauch. Nitrat ist im oberen Stockwerk in ebenso geringen Mengen vorhanden wie im unteren.

b) Im zweiten Grundwasserstockwerk

Das zweite Grundwasserstockwerk führt im wesentlichen zwei chemisch verschiedene Wässer, die räumlich voneinander abgegrenzt werden können. Daneben gibt es noch einige Abweichungen von untergeordneter Bedeutung (Abb. 28).

Von Garmisch-Partenkirchen bis zur Meßstelle 21/3 südlich Eschenlohe führt das zweite Grundwasserstockwerk schwach alkalische Wässer mit ph-Werten zwischen 7,2 und 7,8, die man als Kalkschotterwässer bezeichnen kann, d. h. schwach alkalische Wässer im Kalkkohlensäure – Gleichgewicht mit hohem Magnesiaanteil an der Gesamthärte und sehr geringem Gehalt an Alkali-Ionen.

Im Gebiet von Eschenlohe treten sogenannte Gipswässer auf, die ihren hohen Sulfatgehalt aus gipsführenden Raibler Schichten beziehen.

Die Wässer des sulfatärmeren Bereiches im Süden entsprechen nicht völlig den Kalkschotterwässern, wie sie z. B. im Gebiet der Münchener Schotterebene anzutreffen sind und wie sie von L. Gerb (1956) beschrieben werden. Da das Einzugsgebiet der Loisach keine geschlossene Pflanzendecke aufweist und das Grundwasser zu einem großen Teil aus Flüssen und Bächen gespeist wird (s. S. 71), ist sein Gehalt an freier Kohlensäure nur etwa halb so groß, wie beispielsweise in der Münchener Schotterebene. Damit ist auch die Fähigkeit zur Aufhärtung geringer. Im Gegensatz zu den von L. Gerb beschriebenen Kalkschotterwässern enthalten die Grundwässer des Loisachtales wesentlich mehr Sulfationen, die sie aus gipshaltigen Gesteinen der Talfüllung erhalten, die den Raibler Schichten entstammen.

Die Wässer im südlichen Teil des zweiten Grundwasserstockwerkes sind charakterisiert durch folgenden Chemismus (Mittelwerte aus 53 Analysen der Wasserwerke der Landeshauptstadt München):

Cl'	2,4 mg/l
SO_4''	37,5 mg/l
NO_3'	4,5 mg/l
Ca^{++}	78,5 mg/l
Mg^{++}	28,9 mg/l
Na^+, K^+	0,0 mg/l
CO_2 geb.	83,0 mg/l
CO_2 frei	13,3 mg/l
CO_2 zug.	12,8 mg/l
CO_2 aggr.	< 1,0 mg/l
Fe (ges.)	< 0,1 mg/l
Mn^{++}	0,0 mg/l
SiO_2	3,8 mg/l
O_2	6,7 mg/l
$KMnO_4$-Verbrauch	1,6 mg/l
pH-Wert	7,4
Leitfähigkeit	380 µ S/cm
Trock. R.	265 mg/l
Gesamthärte	12,9 °DH
Karbonathärte	10,5 °DH

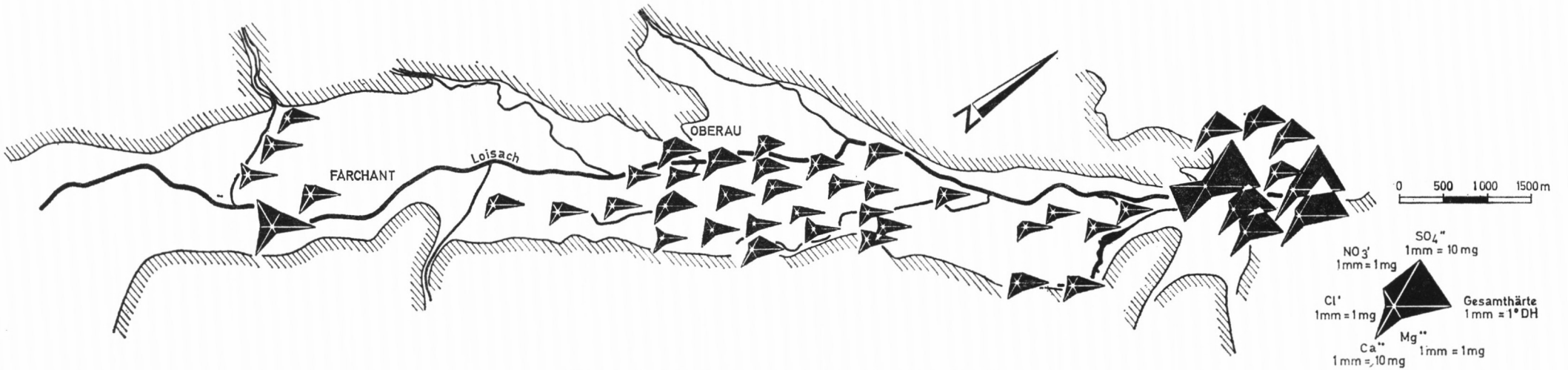


Abb. 28: Der Chemismus im 2. Grundwasserstockwerk.

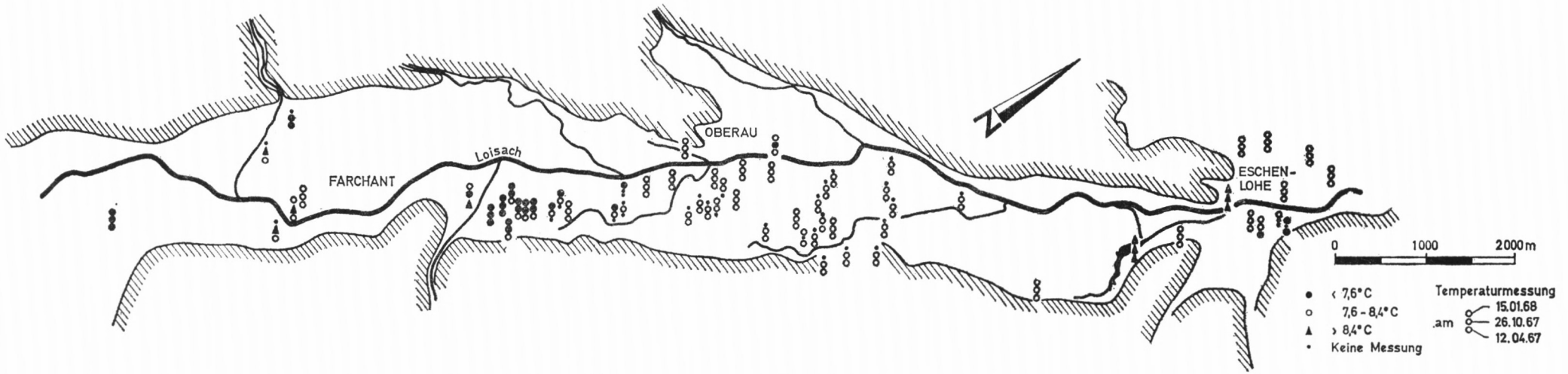


Abb. 29: Temperaturmessungen im 2. Grundwasserstockwerk.

Aus dem Rahmen dieses Normaltypus' fällt die chemische Analyse der Meßstelle D/1. Die Meßstelle D/1 liegt am rechten Loisachufer nahe der Straßenbrücke über die Loisach bei Burgrain (s. Beilage 1). Im Chemismus fallen eine hohe Gesamthärte (um 20 °DH) und eine hohe Karbonathärte (14,5 °DH) auf. Vergleichsweise hoch liegen auch Chlorid mit 5,0 mg/l, Nitrat mit 14,0 mg/l, Calcium mit 150 mg/l und ebenso die freie und die zugehörige Kohlensäure.

300 m südlich der Meßstelle D/1 liegt ein alter Müllplatz. Vielleicht liegt eine Aufhärtung des Grundwassers durch Mülldeponien vor (vgl. L. ZWITTNIG, 1963/64). Eine andere Deutung für die hohe Gesamthärte könnte auch eine Beeinflussung durch Gipswässer sein. Sie müßten aus größeren Tiefen aufdringen. Dagegen sprechen jedoch der relativ geringe Sulfatgehalt, der hohe Nitratgehalt und der hohe Gehalt an Kohlensäure. Eine Aufhärtung durch Müllablagerungen ist daher wahrscheinlicher.

Etwas abweichend von den anderen Meßstellen verhalten sich in ihrem Chemismus auch die Meßstellen 3/4 und 3/5 nahe der Loisach bei Oberau (s. Beilage 1). Auffallend ist vor allem die geringe Gesamthärte, die bei 3/4 zwischen 9,0 °DH und 12,7 °DH und bei 3/5 zwischen 9,5 °DH und 13,3 °DH liegt. An keiner der anderen Meßstellen treten derart geringe Gesamthärten auf. Darin drückt sich möglicherweise eine Beeinflussung durch Versickerungen aus der Loisach aus, deren Wässer eine geringe Gesamthärte haben, die zeitweise bis gegen 8,0 °DH absinkt.

Tab. 5: Analysen von Sulfatwässern aus Grundwassermeßstellen und Quellen
(Analysen der Wasserwerke der Landeshauptstadt München und der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, München)

	26/4 mg/l	27/2 mg/l	Sulfatquelle Eschenlohe mg/l	Mühlbach-quelle 1 mg/l	Mühlbach-quelle 4 mg/l
Cl'	16,3	1,5	62,0	4,9	2,5
SO_4''	240,0	228,0	340,0	624,0	550,9
NO_3'	3,5	2,5	2,0	1,5	2,3
Ca++	130,0	122,9	188,0	257,9	232,0
Mg++	27,8	24,7	40,0	47,4	40,0
CO_2 geb.	80,3	77,0	—	77,0	74,8
CO_2 frei	19,4	17,6	—	17,6	17,2
CO_2 zug.	23,2	20,4	—	42,7	38,4
Fe (ges.)	10,0	0,006	n. n.	0,002	—
Mn++	< 0,01	< 0,01	—	< 0,01	—
SiO_2	3,8	3,8	4,0	3,8	3,5
O_2	4,9	4,6	—	4,3	3,4
$KMnO_4$-Verbrauch	2,2	1,2	—	2,2	1,5
pH	7,2	7,4	—	7,3	7,42
Leitf. (µ S/cm)	762,0	620,0	1000	1140	1035,0
Trock. R. (mg/l)	592,0	542,8	910	854	1032,4
Ges. H. (°DH)	24,6	22,9	35,6	46,4	41,8
Karb. H. (°DH)	10,2	9,8	9,3	9,8	9,8

Die Wässer aus den Meßstellen 26/1, 26/2, 26/4, 27/1 und 27/2 im Bereich von Eschenlohe sind stark sulfathaltig, was auf ihre Beeinflussung durch gipsführende Raibler-Schichten zurückzuführen ist, die am Rande des Loisachtales bei Oberau und an den Mühlbachquellen (vgl. S. 10) und im Untergrund des Loisachtales anstehen. In einem jetzt aufgelassenen Steinbruch bei Oberau wurde zeitweise Gips abgebaut. In den genannten Meßstellen bei Eschenlohe sind der Sulfat-, Calcium- und teilweise auch der Chloridgehalt sehr groß. Dementsprechend ist auch die Gesamthärte hoch. Eisen konnte in allen Meßstellen in geringen Mengen nachgewiesen werden.

Bei Eschenlohe treten auch mehrere sulfatreiche Quellen auf. Am östlichen Talrand liegen die Mühlbachquellen, auch Sieben-Quellen genannt. Es handelt sich um mehrere Quellen mit unterschiedlichem Chemismus. Die Gesamthärte schwankt zwischen 15 °DH und 52°DH. Am westlichen Talrand, beim Bahnübergang unterhalb der Kapelle auf dem Vestbühl, liegen zwei Sulfatquellen, von denen die nördliche gefaßt ist. Sie erreichen ebenfalls Gesamthärten bis zu 40 °DH.

Die Wässer dieser Quellen müssen aus größeren Tiefen (150–200 m) aufsteigen, denn sie weisen Temperaturen bis 10,6 °C auf, während die durchschnittliche Grundwassertemperatur im zweiten Grundwasserstockwerk 7,8–8,0 °C beträgt. Sie müssen im Untergrund in innige Berührung mit gipshaltigen Raibler-Schichten kommen, denen sie ihren Chemismus verdanken.

Die in den Grundwassermeßstellen beobachteten Wässer stellen Mischwässer aus Sulfat- und Kalkschotterwässern dar.

4.3.2. Chemische Wasseruntersuchungen an Quellen und Vorflutern

a) Die Mühlbachquellen (Sieben-Quellen)

Die Mühlbachquellen liegen 2 km südlich Eschenlohe am östlichen Talrand. Auf einer Strecke von etwa 1 km treten wenig über dem Spiegel des Mühlbaches zahlreiche Quellen aus Schuttmassen hervor. Teilweise handelt es sich auch um Grundwasseraufstöße im Bett des Mühlbaches (Abb. 30).

Die Felswände am Talrand bestehen nach eigenen Beobachtungen bis etwa 50 m über Talniveau aus tektonisch stark beanspruchten Raibler Gipsdolomiten. J. Niedermayer (1936) stellte sie in seiner Katierung fälschlich zum Hauptdolomit.

Der Chemismus der Mühlbachquellen ist sehr unterschiedlich. Es wurden acht verschiedene Teilquellen beobachtet, wobei Quelle 1 im Norden, Quelle 8 im Süden liegt.

Die Schüttung der Quellen läßt sich nicht genau erfassen; sie erreicht teilweise mehrere 100 l/s. Jedoch ist festzustellen, daß die Schwankungen der Schüttung von Norden nach Süden abnehmen, wobei an den beiden südlichsten Quellen kaum noch Schwankungen zu bemerken sind.

Die Temperaturen erreichen an den mittleren Quellen (Quellen 2–5) mit 10,5 °C ihre höchsten Werte. An der südlichsten Quelle liegt die Temperatur etwa gleichbleibend bei 7,8–8,0 °C.

Die Gesamthärte erreicht ebenfalls an den mittleren Quellen mit etwa 52 °DH ihre höchsten Werte, während sie an der südlichsten Quelle bei 15–16 °DH liegt.

Aufgrund dieser Beobachtungen sind die Mühlbachquellen in vier Typen einzuteilen.

A) Die nördlichen Quellen 1, 2 und 3 schütten sehr unterschiedlich. Nach längeren Trockenperioden geht ihre Schüttung sehr stark zurück. Ihre Temperaturen liegen zwischen

8,8 und 10,5 °C, die Gesamthärte zwischen 20 und 52 °DH. Auf Grund der witterungsabhängigen Schüttung ist eine Speisung aus Grundwasseraufstößen im wesentlichen auszuschließen. Ihr Einzugsgebiet dürfte das Gebiet der Archtallaine mit den großen Schutthalden unterhalb der Hohen Kiste sein. Die Wässer treten auf dem Umweg über tiefere Raibler-Schichten, in denen sie ihre erhöhten Temperaturen und Gesamthärten erlangen, an den Mühlbachquellen 1, 2 und 3 aus.

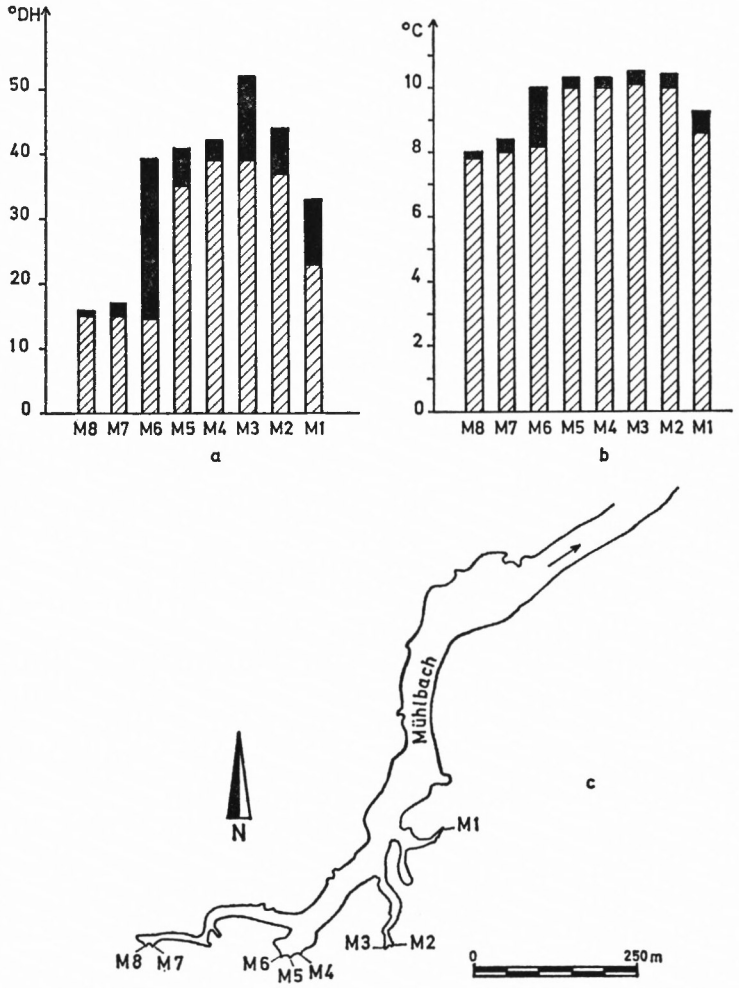


Abb. 30: Die Gesamthärte (a) und die Temperatur (b) der Mühlbachquellen mit Schwankungsbereich (schwarz) c) Lageplan der Mühlbachquellen.

B) Die Mühlbachquellen 4 und 5 zeigen Temperaturen von 10,0–10,3 °C. Die Gesamthärte der Quelle 4 schwankt zwischen 39 °DH und 42 °DH und die der Quelle 5 zwischen 35 und 41 °DH. Die Schüttung ist nahezu gleichbleibend. Die ziemliche Beständigkeit der Werte und die hohe Temperatur der Wässer sprechen für eine Herkunft aus einem tieferen Grundwasserstockwerk. Es muß tiefer liegen als das 2. Grundwasserstockwerk, in dem Temperaturen um 8 °C herrschen. Wahrscheinlich sind die Wässer in dem tieferen Stockwerk bereits stärker mit Calcium- und Sulfationen beladen und steigen dann auf dem Umweg über durchlässige Raibler Rauhwacken an die Oberfläche, wobei sie weiterhin Calcium- und Sulfationen aufnehmen.

C) Die Quelle 8 wird im wesentlichen aus dem zweiten Grundwasserstockwerk gespeist. Der Seeton, der das zweite Grundwasserstockwerk nach oben abdeckt, verzahnt sich am Talrand mit Schuttmassen. In diesen Lockergesteinen steigt das Wasser, da der Druckspiegel des zweiten Grundwasserstockwerkes über Gelände steht (vgl. Beilage 2), zu den Quellen auf. Die Schwankungen des Druckspiegels sind im Bereich der Mühlbachquellen gering. Daher ist auch die Schüttung der Quelle 8 ziemlich gleichbleibend. Die Temperatur und der Sulfatgehalt liegen nur wenig höher als im zweiten Grundwasserstockwerk. Die Quellwässer entstammen also diesem Stockwerk und erhalten nur geringfügige Beimengungen von anderen Wässern.

D) Die Quellen 6 und 7 stellen eine Mischung aus den Typen B und C dar. Während ihre Schüttung ziemlich konstant ist, bilden ihre Temperaturen und ihr Chemismus Übergangswerte von Typ B zu Typ C.

b) Die „Schwefelquelle" bei Eschenlohe

Am südlichen Ortsausgang von Eschenlohe liegt am Bahnübergang unterhalb des Vestbühls die sogenannte Schwefelquelle (Quell-Nr. 9). Sie ist für einen Brunnentrog gefaßt und schüttet gleichbleibend 0,1–0,2 l/s. 300 m südlich des Bahnüberganges liegt 20 m westlich der Straße eine kleine Quelle (Quell-Nr. 10), die etwa 0,2 l/s schüttet. Ihre Temperatur und ihr Chemismus stimmen fast völlig mit der gefaßten Quelle überein.

Beide Quellen zeigen einen hohen Sulfatgehalt (>300 mg/l) und eine Gesamthärte um 35 °DH, während die Karbonathärte bei 10 °DH liegt. Die Temperatur beträgt 10,6 °C.

Auf Grund dieser Eigenschaften könnte man beide Quellen mit dem Typ B der Mühlbachquellen parallelisieren. Beide Quellen weisen jedoch einen vergleichsweise hohen Chloridgehalt von etwa 60 mg/l auf, der etwa zehnfach höher liegt, als die höchsten Werte der Mühlbachquellen. Mit 16,3 mg/l weist lediglich das Grundwasser der Meßstelle 26/4 einen relativ hohen Chloridgehalt auf, sie liegt nur 100 m nördlich der gefaßten Quelle.

Bei einem Vergleich mit anderen Wässern aus Raibler Schichten (Tab. 6) zeigt sich, daß die höchsten Chloridgehalte 20 mg/l nicht überschreiten. Etwas erhöhte Chloridwerte sind jedoch wie in den Mühlbachquellen stets zu verzeichnen. Es muß daraus geschlossen werden, daß die Wässer der „Schwefelquellen" bei Eschenlohe auf chloridreichere Partien der Raibler Schichten gestoßen sind, ehe sie an die Oberfläche traten. Eine Verunreinigung ist unwahrscheinlich, da der Nitratgehalt 2,0 mg/l nicht übersteigt.

c) Die Lauterbachquelle

Die Lauterbachquelle (Quell-Nr. 38) liegt am Talrand östlich des Gutes Buchwies. Sie tritt unterhalb einer Hauptdolomitfelswand aus Schuttmassen hervor. Ihre Schüttung schwankt zwischen 50 l/s und 200 l/s.

Wie ein vom Institut für Radiohydrometrie, der Gesellschaft für Strahlenforschung, München, im Mai 1966, durchgeführter Farbversuch bewies, besteht eine hydrologische Verbindung zwischen der Lauterbachquelle und dem an der Fahrmannslaine versickerten Bachwasser. 21 Stunden nach Eingabe des Farbstoffes zeigten sich die ersten Farbspuren im Wasser der Lauterbachquelle. Sie wird also nicht nur aus Grundwasseraufstößen gespeist, sondern auch aus versickerten Wässern der Fahrmannslaine. Dieser Umstand wirkt sich auf den Chemismus und die Temperatur der Lauterbachquelle aus.

Die Fahrmannslaine steigt aus den Berghängen unterhalb des Bischof (2030 m) in das Loisachtal hinab. Sie führt vor allem im Frühjahr größere Wassermengen mit niedriger

Tab. 6: Chloridgehalt und Gesamthärte verschiedener Raibler-Wässer der Bayerischen Alpen (nach Analysen des Bayer. Landesamtes für Wasserversorgung und Gewässerschutz, München, und der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München)

	Cl' mg/l	Gesamthärte DH
„Schwefelquelle" Eschenlohe	62,0	35,6
Mühlbachquelle 3 Eschenlohe	7,1	39,5
Mühlbachquelle 4 Eschenlohe	7,16	50,8
Gießenbachquelle Kiefersfelden	7,5	20,2
Bohrbrunnen Kiefersfelden	17,8	13,2
Durhamer Quelle Miesbach	7,1	21,0

Temperatur und geringer Gesamthärte ins Tal, wo sie vollkommen in einem Schuttkegel versickern und später an der Lauterbachquelle teilweise wieder austreten. In der Lauterbachquelle macht sich die Versickerung von Wässern der Fahrmannslaine durch ein Absinken von Temperatur und Gesamthärte bemerkbar (s. Abb. 31).

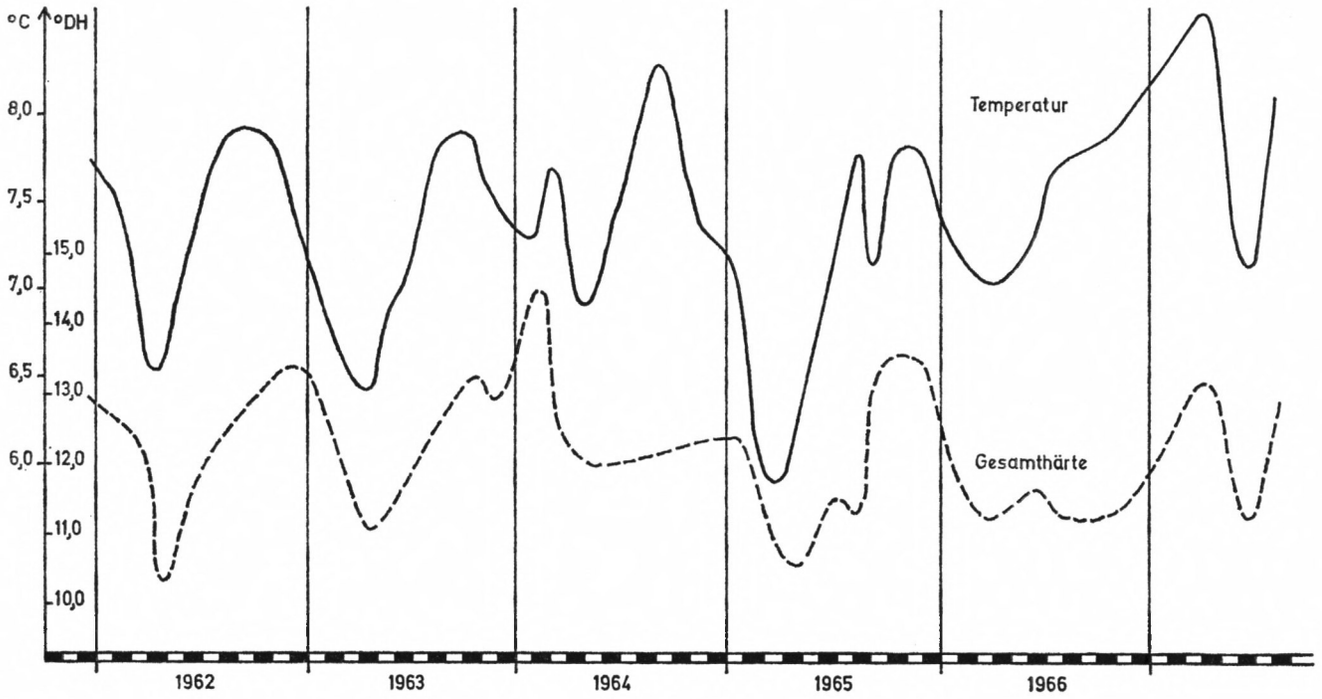


Abb. 31: Abhängigkeit der Temperatur und der Gesamthärte der Lauterbachquelle (Quell-Nr. 38) von der Jahreszeit (nach Kalenderjahr).

4.3.3. Der Chemismus der Wässer der Loisach und der Bäche im Talbereich

Die Wässer der Loisach sind etwas stärker alkalisch als das Grundwasser. Ihr ph-Wert liegt bei 8,0–8,5, der des Grundwassers bei 7,2–7,8. Das Loisachwasser enthält weniger gelöste Substanzen als das Grundwasser. Dagegen ist der $KMnO_4$-Verbrauch des Loisachwassers aufgrund der Verunreinigung durch Abwässer etwas größer.

Ronetsbach, Pizikobach, Pöttingerbach, Rörlbach, Ursprungsbach und Lauterbach werden im wesentlichen aus Grundwasseraufstößen gespeist, und daher ist ihr Chemismus dem des zweiten Grundwasserstockwerkes sehr ähnlich. Rörlbach, Ursprungsbach und Lauterbach werden teilweise durch die versickernden Wässer von Kuhflucht, bzw. Fahrmannslaine beeinflußt. Zur Zeit der Schneeschmelze oder nach stärkeren Regenfällen sinkt daher ihre Gesamthärte ab.

Der Mühlbach wird aus Grundwasseraufstößen des zweiten Grundwasserstockwerkes und von sulfatreichen Raibler-Wässern gespeist. Der Chemismus seiner Wässer ist charakterisiert durch die im Vergleich zu den anderen Bächen hohen Sulfatgehalte.

4.4. Temperaturmessungen an Grundwassermeßstellen und Brunnen

Mit einem elektrischen Temperaturmeßgerät, das nach dem Prinzip der Wheatstoneschen Brücke arbeitet und das die Firma C. M. Hofbauer, Landshut, entwickelte, wurden zahlreiche Messungen an Grundwasserbeobachtungsstellen vorgenommen. Die erste Meßreihe fand Mitte April 1967 nach der Schneeschmelze statt, die zweite Meßreihe Ende Oktober 1967 nach einer längeren Trockenperiode und die dritte Meßreihe Mitte Januar 1968 am Ende einer etwa vierzehntägigen Frostperiode.

Es zeigte sich, daß die Temperaturen im unteren Grundwasserstockwerk, im Gebiet zwischen Oberau und den Mühlbachquellen, ungefähr gleichbleibend bei 7,8–8 °C lagen (Abb. 29). Unregelmäßigkeiten traten lediglich an der Meßstelle 3/5 bei Oberau nahe der Loisach auf. Die Temperaturen schwankten hier zwischen 6,9 und 8,3 °C.

Bei Eschenlohe treten im Grundwasser an den Talrändern höhere Temperaturen auf als im ganzen übrigen Talbereich. Dort liegen auch die relativ warmen sulfatreichen Quellen. Das Grundwasser der Meßstelle 21/1 weist Temperaturen um 8,6 °C auf, das der Meßstelle 26/4 Temperaturen von 8,7–9,7 °C. Hier treten anscheinend wärmere Wässer aus größeren Tiefen in das zweite Grundwasserstockwerk ein. Südlich von Oberau sind die Grundwassertemperaturen wesentlich uneinheitlicher als nördlich des Ortes. Die Meßstellen F/1 und E/1 bei Garmisch-Partenkirchen weisen noch ziemlich niedrige Temperaturen auf. Der Talkessel von Garmisch-Partenkirchen ist ein Gebiet mit bevorzugter Grundwasserneubildung, die hauptsächlich im Frühjahr durch relativ kalte Schmelzwässer erfolgt.

Im Profil D südlich Farchant treten höhere Temperaturen auf als an den Meßstellen F/1 und E/1. Während die Temperaturen bei E/1 noch um 7,3 °C liegen, steigen sie im D-Profil bis auf 8,7 °C an. Eine Infiltration von Loisachwasser in die tieferen Zonen des Grundwassers im D-Profil kommt nicht in Frage, da die Temperatur des Loisachwassers meist wesentlich geringer ist als die des Grundwassers. Für die erhöhten Temperaturen sind daher entweder Grundwasseraufstöße aus größerer Tiefe oder Einspeisungen aus der Felsumrandung des Tales verantwortlich zu machen. Auch bei der Auswertung der Filtergeschwindigkeitsmessungen des Institutes für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung, München, im Profil D wurde der Schluß gezogen, daß von der Felsumrandung des Tales Wasser in die Talfüllung eingespeist wird. Die niedrigen Temperaturen am Pegel D/6k sind auf Versickerungen aus dem Lahnenwiesgraben zurückzuführen.

Nach den Temperaturmessungen am Pegel D/1k über die gesamte Filterstrecke von 3,2–22,2 m unter Geländeoberkante scheinen sich hier Infiltrationen von der Loisach in das Grundwasser bemerkbar zu machen (Tab. 7).

Am 12. 4. 1967 und am 26. 10. 1967 zeigt sich im Grundwasser nach oben eine Angleichung an die Temperatur der Loisach. Die Beeinflussung der Temperatur macht sich nur

bis zu einer Teufe von etwa 20 m bemerkbar. Am 17. 1. 1968 scheint bei geringem Abfluß in der Loisach keine bedeutende Versickerung stattgefunden zu haben. Die Grundwassertemperatur beträgt gleichbleibend 8,3 °C.

Auffallend ist das Verhalten der Grundwassertemperaturen im Bereich der Brunnen 1–3. Es treten häufig sehr niedrige Temperaturen auf. Die niedrigste wurde im April 1967 mit 5,6 °C an der Meßstelle 1/P8 festgestellt. An der Meßstelle 1/P1 wurden im April 1967 8,6 °C gemessen. Die hohe Temperatur deutet auf Grundwasserstöße aus größeren Tiefen oder auf Einspeisungen von Wasser aus der Felsumrandung des Tales.

Tab. 7: Grundwassertemperaturen an der Meßstelle D/1k

Teufe (m)	17. 4. 1967 °C	26. 10. 1967 °C	17. 1. 1968 °C
Loisach Burgrain	4,8	8,8	2,2
4	4,9	8,6	8,3
5	5,0	8,6	8,3
6	5,0	8,6	8,3
7	5,0	8,6	8,3
8	5,15	8,6	8,3
9	5,4	8,6	8,3
10	6,0	8,6	8,3
11	5,75	8,6	8,3
12	5,7	8,6	8,3
13	6,4	8,6	8,3
14	6,1	8,4	8,3
15	6,55	8,4	8,3
16	6,7	8,4	8,3
17	7,1	8,4	8,3
18	8,15	8,4	8,3
20	8,3	8,3	8,3
22	8,1	8,2	8,3

Die Temperaturverteilung in den Meßstellen war im April 1967 am unterschiedlichsten. Sie reichte an den acht Pegeln im Bereich des Brunnens 1 von 5,6–8,6 °C mit einem Mittel von 7,0 °C, wobei das Temperaturminimum bei den Pegeln 1/P2 und 1/P8 lag. Im Oktober 1967 hatten sich die Temperaturen ausgeglichen; sie schwankten nur noch zwischen 6,5 und 7,0 °C, mit einem Mittel von 6,7 °C. Im Januar 1968 waren die Temperaturen weiter angestiegen. Sie lagen zwischen 6,9 und 7,8 °C mit einem Mittel von 7,2 °C.

Die niedrigen Temperaturen des Grundwassers deuten auf Einspeisungen von kalten Wässern in das zweite Grundwasserstockwerk. Eine Einspeisung von Wässern mit Temperaturen von weniger als 5,6 °C aus der Felsumrandung des Tales ist unwahrscheinlich. Für die niedrigen Temperaturen im Bereich der Brunnen 1–3 sind daher wahrscheinlich die kalten, aus dem Kuhfluchtgraben versickernden Wässer verantwortlich.

Die Temperaturen des Wassers im ersten Grundwasserstockwerk werden durch die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen beeinflußt (A. THURNER, 1967). Im Winter und im Frühjahr nimmt die Temperatur von der Grundwasseroberfläche aus nach unten zu,

während im Sommer und im Herbst die höheren Temperaturen nahe der Grundwasseroberfläche liegen (s. Tab. 8).

Tab. 8: Grundwassertemperaturen im Rammpegel 28/2 R zu verschiedenen Jahreszeiten

Teufe (m)	12. 4. 1967 °C	26. 10. 1967 °C	15. 1. 1968 °C
2	5,6	9,2	7,3
3	5,7	8,8	7,8
4	6,3	8,5	8,3
5	6,6	8,3	8,6
6	7,2	7,9	8,8

Auffallend bei zahlreichen Meßstellen ist ein Temperaturmaximum zwischen 5 und 20 m Teufe. Bis zu dieser Tiefe scheint der Einfluß der warmen Oberflächenwässer zu reichen. Der Temperaturaustausch im Grundwasser erfolgt langsam, so daß im Januar teilweise noch die hohen Temperaturen des vergangenen Sommers erhalten sind.

Die Wassertemperaturen in mehr als 2–3 m Tiefe unter der Grundwasseroberfläche entsprechen auch in den mit Vollrohren ausgebauten Strecken den Temperaturen des umgebenden Grundwassers, wie Vergleiche an nebeneinanderliegenden Meßstellen des unteren und oberen Grundwasserstockwerkes zeigten (Tab. 10). Wärmeströmungen innerhalb der

Tab. 9: Temperaturprofile an verschiedenen Meßstellen am 15. 1. 1968

Teufe (m)	Meßstelle								
	2/RP3 °C	3/RP3 °C	3/4 °C	3/5 °C	28/2 °C	28/3 °C	28/4 °C	28/4R °C	28/5 °C
1	5,1	—	3,8	—	—	7,4	—	5,1	9,2
2	6,0	7,0	3,9	6,4	6,9	7,2	7,9	6,1	8,2
3	6,9	7,6	3,6	—	8,0	8,1	8,3	7,1	8,7
4	7,3	8,2	3,5	—	8,2	8,8	8,7	8,3	9,2
5	7,6	—	—	5,9	—	—	—	8,9	9,2
6	7,6	8,3	4,0	—	8,9	9,5	8,7	9,0	—
7	7,6	—	—	—	—	—	—	8,8	—
8	7,6	8,0	8,2	—	9,1	9,8	8,6	—	—
9	7,6	—	—	—	—	—	—	—	—
10	7,6	7,8	9,8	8,1	9,25	9,6	8,6	—	8,3
11	7,4	—	—	—	9,35	—	—	—	—
12	7,3	7,8	—	—	9,3	9,3	—	—	—
13	6,9	—	10,0	—	9,0	—	—	—	—
14	6,8	—	—	—	—	—	—	—	—
15	6,6	—	9,8	8,8	8,4	9,0	8,3	—	—
20	—	—	8,8	9,3	7,7	8,4	8,1	—	8,2
25	—	—	8,2	7,7	7,7	8,3	7,9	—	7,8

Wassersäule im Pegelrohr scheinen von untergeordneter Bedeutung zu sein, sonst müßten in den oberen Metern der Wassersäule höhere Temperaturen auftreten.

Im Temperaturprofil vom 15. 1. 1968 an der Meßstelle 3/4 (Tab. 9) zeigt sich die höchste Temperatur mit 10,0 °C in 13 m Tiefe, während in den oberen Metern um mehr als 6 °C niedrigere Werte auftreten. Von der Teufe 6–8 m erfolgt ein Temperatursprung von mehr als 4,0 °C. Derart niedrige Werte von 3,5–4,0 °C wurden außer am Rammpegel 3/5R, der Temperaturen von 3,4–5,7 °C aufwies, an keiner anderen Meßstelle erreicht. In den übrigen Pegeln lagen die Temperaturen durchwegs über 5,0 °C. Die niedrigen Temperaturen in den Meßstellen 3/4 und 3/5 R am 15. 1. 1968 sind nur durch Infiltration kalten Loisachwassers in die oberen Bereiche des 1. Grundwasserstockwerkes zu erklären. Die Temperatur der Loisach bei Oberau betrug am 15. 1. 1968 am rechten Ufer 2,1 °C.

Tab. 10: Grundwassertemperaturen in nebeneinanderliegenden Meßstellen des ersten und zweiten Grundwasserstockwerkes

Grundw.-stockwerk	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
	Meßstelle							
Teufe (m)	3/5R	3/5	28/2R	28/2	28/3R	28/3	28/4R	28/4
2	—	—	7,3	6,9	7,5	7,2	—	—
3	—	—	7,8	8,0	8,1	8,1	7,1	8,3
4	—	—	8,3	8,2	8,8	8,8	8,3	8,7
5	5,7	5,9	8,6	—	—	—	8,9	8,7
6	—	—	8,8	8,9	—	—	9,0	8,7
7	—	—	—	—	—	—	8,8	8,7

5. Wasserhaushalt

5.1. Abgrenzung des Einzugsgebietes der Loisach für den Pegel Eschenlohe

Das Niederschlagsgebiet der Loisach für den Pegel Eschenlohe beträgt 467 km². An mehreren Stellen liegen jenseits der Grenze des Niederschlagsgebietes unterirdische Einzugsgebiete (Abb. 32):

1. Über die gefaßten Maulenbachquellen entwässert ein Teil des Ammertales zur Loisach (s. S. 32).
2. Der Plansee, der zum Einzugsgebiet des Lechs gehört, verliert an seinem Ostende durch Bergsturzmassen hindurch Wasser (E. FELS, 1913). Es gelangt in die Neidernach und damit in die Loisach.
3. An den Südwänden des Wettersteingebirges erstreckt sich ein schmaler Geländestreifen, der unterirdisch zum Loisachgebiet entwässert, da die Gesteinsschichten nach Norden in Richtung Loisachtal einfallen.
4. An der Esterbergalm nördlich des Wank liegt ein etwa 5 km² großes Gebiet, das seine Wässer unterirdisch an die Loisach verliert (s. S. 13).

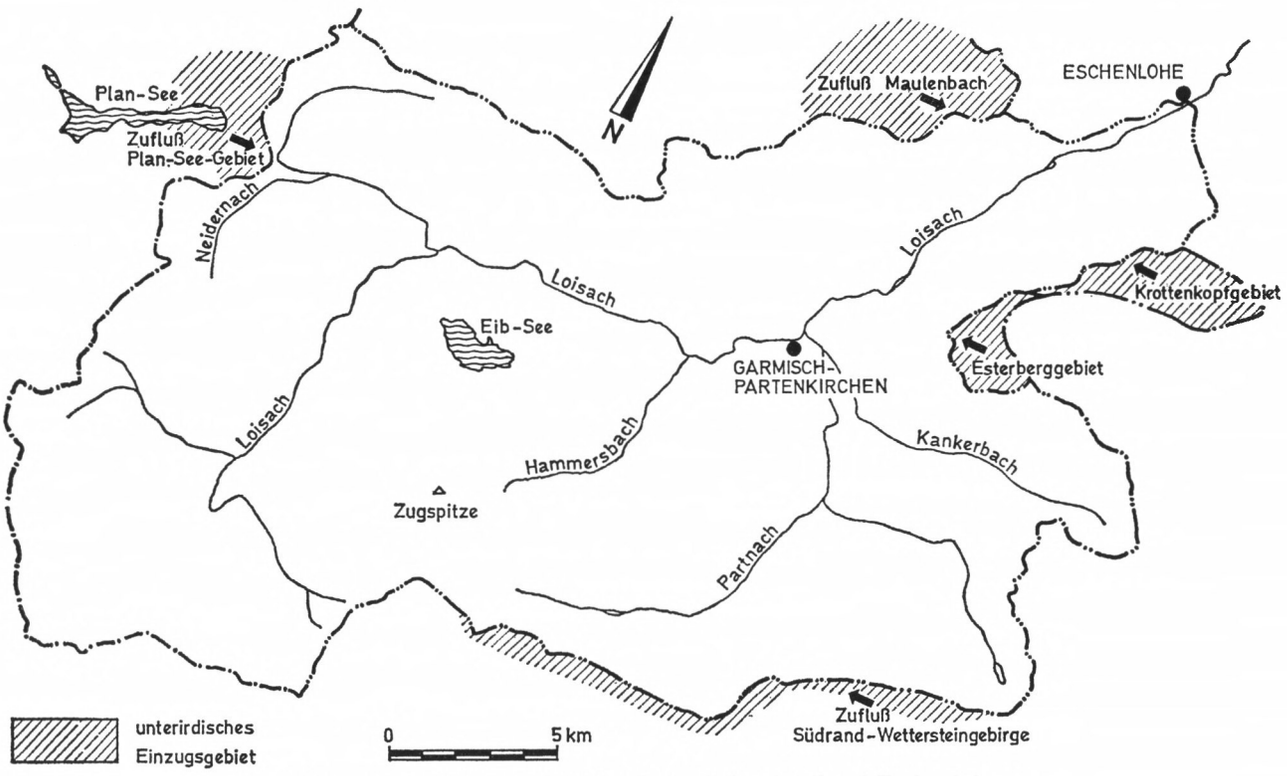


Abb. 32: Das Einzugsgebiet der Loisach für den Pegel Eschenlohe.

5. Am Krottenkopf erstreckt sich ein ca. 10 km² großes z. T. verkarstetes Gelände, das zur Loisach entwässert (s. S. 20).

Im übrigen stimmen die Grenzen von Niederschlagsgebiet und Einzugsgebiet für den Pegel Eschenlohe im wesentlichen überein.

5.2. Abflußbestimmungen

Das Einzugsgebiet der Loisach für den Pegel Eschenlohe liegt in einem Gebiet mit hohen Niederschlägen. Der Abfluß des gesamten Gebietes tritt teils unterirdisch, teils oberirdisch durch die Engstelle des Loisachtales bei Eschenlohe hindurch. Der oberirdische Abfluß ist langjährig gemessen.

Es bot sich hier die Möglichkeit, den Gesamtabfluß des Einzugsgebietes ziemlich exakt zu fassen. Leider ist der genaue Querschnitt des Grundwasserleiters in der Engstelle des Tales bei Eschenlohe nicht bekannt, da keine der Aufschlußbohrungen in Talmitte die Grundwassersohle erreichte.

Im folgenden wird versucht, den unterirdischen Abfluß im Loisachtal mit verschiedenen Methoden zu erfassen.

Zunächst sei eine Berechnung nach dem DARCY'schen Gesetz für verschiedene Querprofile unter Annahme jener k-Werte, die bei den Pumpversuchen der Wasserwerke der Landeshauptstadt München an den Brunnen 1–6 nach der dynamischen Brunnentheorie von C. v. THEIS ermittelt wurden, durchgeführt:

Das DARCY'sche Gesetz lautet:

$$Q = k \cdot I \cdot F$$

Darin bedeuten:

Q = Wassermenge in der Zeiteinheit (m³/s)
k = Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
I = Gefälle
F = durchströmte Fläche (m²)

Berechnung für das Profil durch die Meßstellen D/1k, D/2k, D/4k und D/6k (s. Lageplan Beilage 1):

	$I_{MW} = 4{,}4\,‰$;	$F_{MW} = 108000$ m²
k = 0,02 m/s;	$I_{NW} = 3{,}5\,‰$;	$F_{NW} = 102000$ m²
	$I_{HW} = 5{,}2\,‰$;	$F_{HW} = 114000$ m²

(k-Wert: nach Pumpversuchen der Stadtwerke München im Bereich der Brunnen 1–6; I_{MW}, I_{NW}, I_{HW}: nach graphischer Darstellung der Grundwasserspiegel, vgl. Abb. 24; F_{MW}, F_{NW}, F_{HW}: planimetriert nach graphischer Darstellung des geologischen Profils).

Damit ergeben sich folgende unterirdische Abflüsse:

$Q_{MW} = 9{,}6$ m³/s; $Q_{NW} = 7{,}2$ m³/s; $Q_{HW} = 12{,}0$ m³/s.

In den Jahren 1961 und 1962 wurden von den Wasserwerken der Landeshauptstadt München im D-Profil südlich Farchant k-Wertbestimmungen nach der sogenannten Piezo-

metermethode durchgeführt. Dabei wurde ein mittlerer k-Wert von 0,53 · 10^{-2} m/s festgestellt. Mit diesem k-Wert ergeben sich folgende Abflüsse:

	$I_{MW} = 4{,}4\,‰$;	$F_{MW} = 108000\ m^2$
$k = 0{,}53 \cdot 10^{-2}$ m/s;	$I_{NW} = 3{,}5\,‰$;	$F_{NW} = 102000\ m^2$
	$I_{HW} = 5{,}2\,‰$;	$F_{HW} = 114000\ m^2$
$Q_{MW} = 2{,}5\ m^3/s$;	$Q_{NW} = 1{,}9\ m^3/s$;	$Q_{HW} = 3{,}2\ m^3/s$.

Diese Werte der zweiten Berechnung sind wesentlich geringer als die vorher genannten, weil für sie ein k-Wert eingesetzt wurde, der um etwa ein Viertel geringer ist als jener der ersten Berechnung. Eine Erklärung für derartige Unterschiede im k-Wert zwischen dem D-Profil und dem Bereich zwischen den Brunnen 1–6 ist allerdings an Hand der Schichtenverzeichnisse der Aufschlußbohrungen nicht zu finden.

Berechnung für das Profil durch die Meßstellen C/1 und C/2 (s. Lageplan Beilage 1):

	$I_{MW} = 4{,}1\,‰$;	$F_{MW} = 95000\ m^2$
$k = 0{,}019$ m/s;	$I_{NW} = 3{,}0\,‰$;	$F_{NW} = 92000\ m^2$
	$I_{HW} = 5{,}2\,‰$;	$F_{HW} = 98000\ m^2$

(k-Wert: nach Pumpversuchen der Stadtwerke München am Brunnen 1; I_{MW}, I_{NW}, I_{HW}: nach graphischer Darstellung der Grundwasserspiegel, vgl. Abb. 24; F_{MW}, F_{NW}, F_{HW}: planimetriert nach graphischer Darstellung des geologischen Profils).

Damit ergeben sich folgende unterirdische Abflüsse:

$Q_{MW} = 7{,}4\ m^3/s$; $Q_{NW} = 5{,}2\ m^3/s$; $Q_{HW} = 9{,}7\ m^3/s$.

Der unterirdische Abfluß setzt sich im Bereich zwischen den Brunnen 1 und 6 aus dem Abfluß im ersten und im zweiten Grundwasserstockwerk zusammen. Der k-Wert im ersten Stockwerk dürfte sich nicht wesentlich von dem im zweiten Stockwerk unterscheiden, da nach der Kornverteilung (s. Abb. 3 und 4) die Zusammensetzung der Kiese des ersten und des zweiten Grundwasserstockwerkes fast gleich ist. Er wird daher in den folgenden Berechnungen mit 0,02 m/s angesetzt.

Berechnung für das Profil durch die Meßstellen A/1, A/2, A/3 und A/4 (s. Lageplan Beilage 1):

1. Grundwasserstockwerk:

$k = 0{,}02$ m/s;	$I = 5{,}0\,‰$;	$F = 9000\ m^2$
	$Q_1 = 0{,}9\ m^3/s$	

2. Grundwasserstockwerk:

	$I_{MW} = 4{,}6\,‰$;	
$k = 0{,}022$ m/s;	$I_{NW} = 4{,}25\,‰$;	$F = 45000\ m^2$
	$I_{HW} = 5{,}0\,‰$;	
$Q_{2MW} = 4{,}5\ m^3/s$;	$Q_{2NW} = 4{,}2\ m^3/s$;	$Q_{2HW} = 5{,}0\ m^3/s$

(k-Werte: nach Pumpversuchen der Stadtwerke München am Brunnen 3; Gefälle I: nach graphischer Darstellung der Grundwasserspiegel, vgl. Abb. 24 und Beilage 2; durchströmte Flächen F: planimetriert nach graphischer Darstellung des geologischen Profils).

Damit ergeben sich folgende Werte für den gesamten unterirdischen Abfluß ($Q_1 + Q_{2MW}$; $Q_1 + Q_{2NW}$; $Q_1 + Q_{2HW}$):

$Q_{MW} = 5{,}4$ m³/s; $Q_{NW} = 5{,}1$ m³/s; $Q_{HW} = 5{,}9$ m³/s.

Berechnung für das Profil durch die Meßstellen 1/1, 1/a, 1/b, 1/2 und 1/3 (s. Lageplan Beilage 1):

1. Grundwasserstockwerk:

$k = 0{,}02$ m/s;	$I_1 = 5{,}0‰$; $Q_1 = 2{,}0$ m³/s	$F = 20000$ m²

2. Grundwasserstockwerk:

	$I_{MW} = 4{,}6‰$;	$F = 48000$ m²;
$k = 0{,}022$ m/s;	$I_{NW} = 4{,}25‰$;	
	$I_{HW} = 5{,}0‰$;	
$Q_{2MW} = 4{,}8$ m³/s;	$Q_{2NW} = 4{,}5$ m³/s;	$Q_{2HW} = 5{,}3$ m³/s.

(k-Werte: nach Pumpversuchen der Stadtwerke München am Brunnen 3; Gefälle I: nach graphischer Darstellung der Grundwasserspiegel, vgl. Abb. 24 und Beilage 2; durchströmte Flächen F: planimetriert nach graphischer Darstellung des geologischen Profils).

Damit ergeben sich folgende Werte für den gesamten unterirdischen Abfluß ($Q_1 + Q_{2MW}$; $Q_1 + Q_{2NW}$; $Q_1 + Q_{2HW}$):

$Q_{MW} = 6{,}8$ m³/s; $Q_{NW} = 6{,}5$ m³/s; $Q_{HW} = 7{,}3$ m³/s.

Berechnung für das Profil durch die Meßstellen 4/AK, 4/BK, 4/CK, 4/DK und 4/EK (s. Lageplan Beilage 1):

1. Grundwasserstockwerk:

$k = 0{,}02$ m/s;	$I = 4{,}0‰$; $Q_1 = 1{,}6$ m³/s.	$F = 20000$ m²

2. Grundwasserstockwerk:

	$I_{MW} = 2{,}8‰$;	
$k = 0{,}019$ m/s;	$I_{NW} = 2{,}4‰$;	$F = 66000$ m²
	$I_{HW} = 3{,}2‰$;	
$Q_{2MW} = 3{,}5$ m³/s;	$Q_{2NW} = 3{,}0$ m³/s;	$Q_{2HW} = 4{,}0$ m³/s.

(k-Werte: nach Pumpversuchen der Stadtwerke München an den Brunnen 5 und 6; Gefälle I: nach graphischer Darstellung der Grundwasserspiegel, vgl. Abb. 24 und Beilage 2; durchströmte Flächen F: planimetriert nach graphischer Darstellung des geologischen Profils).

Damit ergeben sich folgende Werte für den gesamten unterirdischen Abfluß ($Q_1 + Q_{2MW}$; $Q_1 + Q_{2NW}$; $Q_1 + Q_{2HW}$):

$Q_{MW} = 5{,}1$ m³/s; $Q_{NW} = 4{,}6$ m³/s; $Q_{HW} = 5{,}6$ m³/s.

Berechnung für das Profil durch die Meßstellen 7/1, 7/2, 7/3 und 7/4 (s. Lageplan Beilage 1):

1. Grundwasserstockwerk:

$k = 0{,}02$ m/s; $I = 4{,}0‰$; $F = 5000$ m²;
$Q_1 = 0{,}4$ m³/s.

2. Grundwasserstockwerk:

$k = 0{,}022$ m/s; $I_{MW} = 3{,}3‰$; $I_{NW} = 3{,}0‰$; $I_{HW} = 3{,}5‰$; $F = 70000$ m²

$Q_{2MW} = 5{,}1$ m³/s; $Q_{2NW} = 4{,}6$ m³/s; $Q_{2HW} = 5{,}4$ m³/s.

(k-Werte: nach Pumpversuchen der Stadtwerke München am Brunnen 6; Gefälle I: nach graphischer Darstellung der Grundwasserspiegel, vgl. Abb. 24 und Beilage 2; durchströmte Flächen F: planimetriert nach graphischer Darstellung des geologischen Profils).

Damit ergeben sich folgende Werte für den gesamten unterirdischen Abfluß ($Q_1 + Q_{2MW}$; $Q_1 + Q_{2NW}$; $Q_1 + Q_{2HW}$):

$Q_{MW} = 5{,}5$ m³/s; $Q_{NW} = 5{,}0$ m³/s; $Q_{HW} = 5{,}8$ m³/s.

Berechnung für das Profil durch die Meßstellen 26/1, 26/2 und 26/4 (s. Lageplan Beilage 1):

Der k-Wert wird mit 0,02 m/s wie im Bereich der Brunnen 1 bis 6 angenommen. Getrennte Stockwerke bestehen nicht.

$k = 0{,}02$ m/s; $I_{MW} = 3{,}9‰$; $I_{NW} = 4{,}3‰$; $I_{HW} = 3{,}5‰$; $F = 40000$ m²

(k-Wert: nach Pumpversuchen der Stadtwerke München im Bereich der Brunnen 1–6; Gefälle I: nach graphischer Darstellung der Grundwasserspiegel, vgl. Abb. 24; durchströmte Fläche F: Mindestfläche planimetriert nach graphischer Darstellung des geologischen Profils).

$Q_{MW} = 3{,}1$ m³/s; $Q_{NW} = 3{,}4$ m³/s; $Q_{HW} = 2{,}8$ m³/s.

Der Abfluß bei NW ist im Profil 26/1–26/4 größer als bei HW, da das Gefälle bei NW größer ist als bei HW.

Es ergeben sich also nach der Berechnung mit dem Gesetz von DARCY im Untergrund des Loisachtales von Süden nach Norden folgende Abflüsse:

	HW (m³/s)	MW (m³/s)	NW (m³/s)
Profil D; k = 0,02 m/s	12,0	9,6	7,2
k = 0,0053 m/s	3,2	2,5	1,9
Profil C/1–C/2	9,7	7,4	5,2
Profil A/1–A/4	5,9	5,4	5,1
Profil 1/1–1/3	7,3	6,8	6,5
Profil 4/AK–4/EK	5,6	5,1	4,6
Profil 7/1–7/4	5,8	5,5	5,0
Profil 26/1–26/4	2,8	3,1	3,4

Aus diesen Berechnungen ersehen wir, daß der unterirdische Abfluß von Süden nach Norden geringer wird. Da sich der Querschnitt des Grundwasserleiters verringert (s. Abb. 13), werden größere Wassermengen aus dem unterirdischen Abfluß durch Quellaufstöße an die Vorfluter abgegeben.

Der Mittelwasserabfluß im Profil D dürfte für den k-Wert 0,02 m/s mit 9,6 m³/s zu hoch und mit 2,5 m³/s für den k-Wert 0,0053 m/s zu niedrig liegen. Denn, während des Großpumpversuches 1966 wurden bei mittleren Grundwasserständen 3,4 m³/s Grundwasser entnommen; dennoch waren weiterhin Grundwasseraufstöße zu verzeichnen. Das bedeutet, daß der unterirdische Abfluß wesentlich größer war als 3,4 m³/s.

Die Schwankungen des Abflusses zwischen NW und HW nehmen nach den Berechnungen von Süden nach Norden ab, sie betragen im Profil D mehrere m³/s, bei Profil 26 weniger als einen m³/s. Der unterirdische Abfluß bei Eschenlohe ist nahezu gleichbleibend.

In den obigen Berechnungen wurden k-Werte verwendet, die nach der dynamischen Brunnentheorie von C. v. THEIS durch die Stadtwerke der Landeshauptstadt München ermittelt wurden und im Mittel bei 0,02 m/s liegen.

Bei einer Berechnung nach der DUPUIT-THIEM'schen Formel für gespannte Wässer erhält man geringere k-Werte. Die DUPUIT-THIEM'sche Formel lautet:

$$k = \frac{Q \cdot (\ln x_2 - \ln x_1)}{2\pi \cdot M \cdot (h_2 - h_1)}$$

Darin bedeuten:

k	= Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserleiters (m/s)
Q	= Entnahmemenge (m³/s)
x_1 und x_2	= Entfernungen der Beobachtungsrohre von der Brunnenachse (m), (s. Abb. 33)
M	= Mächtigkeit des gespannten Wasserleiters (m), (s. Abb. 33)
h_2 und h_1	= Höhen zwischen dem abgesenkten Druckspiegel und der Grundwassersohle (m), (s. Abb. 33)

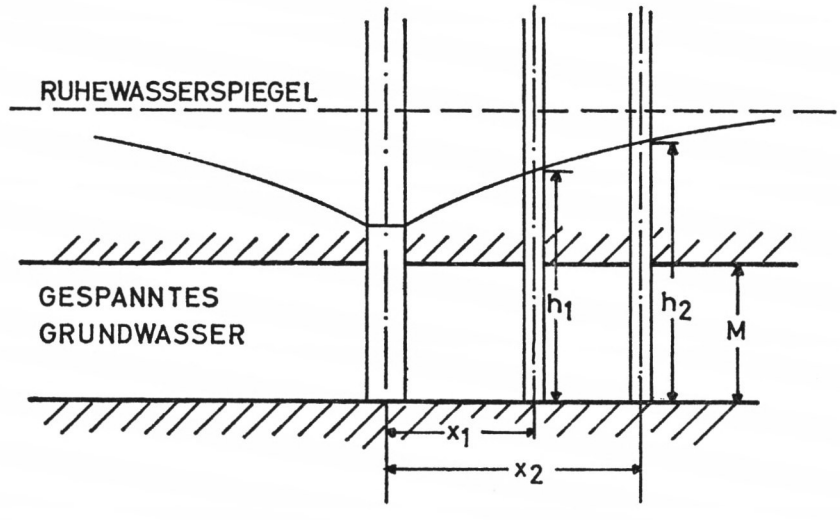


Abb. 33: Profil eines Brunnens mit zwei Beobachtungsrohren im gespannten Grundwasser.

Mit der DUPUIT-THIEM'schen Formel für gespannte Wässer erhält man folgende k-Werte:

Brunnen 1: k = 0,01 m/s
Brunnen 2: k = 0,01 m/s
Brunnen 3: k = 0,017 m/s

Für die Brunnen 3, 4 und 5 konnte das Berechnungsverfahren nicht angewendet werden, da geeignete Beobachtungsrohre fehlten. Die mit der DUPUIT-THIEM'schen Gleichung bestimmten k-Werte sind nur etwa halb so groß, wie die nach der dynamischen Brunnentheorie von C. v. THEIS. Da der k-Wert proportional in die DARCY'sche Gleichung eingeht, ergäbe sich nur ein etwa halb so großer unterirdischer Abfluß im Bereich der Brunnen, wie beim vorherigen Verfahren.

Das Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung, München, führte im Profil D südlich von Farchant Filtergeschwindigkeitsmessungen mit Radioisotopen durch. Dabei wurde eine mittlere Filtergeschwindigkeit von $v_f = 3$ bis 5 m/Tag ermittelt.

Mit der Kontinuitätsgleichung

$$Q = v_f \cdot F$$

läßt sich ein mittlerer unterirdischer Abfluß Q im Profil D errechnen. Er beträgt unter Annahme einer Querschnittsfläche F = 100000 m² je nach Gefälle

3,0–5,0 m³/s.

Von den Wasserwerken der Landeshauptstadt München wurden mit der dynamischen Brunnentheorie von C. v. THEIS bei MW unterirdische Abflüsse im zweiten Grundwasserstockwerk von 4,0 m³/s (bei Brunnen 1) bis 2,0 m³/s (bei Brunnen 6) bestimmt.

Abflußberechnung nach der Wasserhaushaltsgleichung:

Nach einem Gutachten des Wetteramtes München (E. REICHEL, 1954) über die Niederschlagsverteilung von 1891–1930 beträgt der mittlere Jahresniederschlag für das Niederschlagsgebiet des Loisachpegels Eschenlohe 1665 mm. Bei einer mittleren Gebietshöhe von 1250 m ergibt sich danach eine mittlere Verdunstung von etwa 460 mm pro Jahr. Das Niederschlagsgebiet für den Loisachpegel Garmisch-Knorrsteg beträgt 392,4 km², für den Pegel Eschenlohe 467 km².

Mit diesen Werten und den zusätzlichen unterirdischen Einzugsgebieten ergeben sich folgende Berechnungen:

Pegel Garmisch-Knorrsteg:			
Mittlerer Jahresniederschlag 1665 mm	= 20,7 m³/s		
Verdunstung 460 mm	= 5,7 m³/s		
Gesamtabfluß (unter- und oberirdisch)	=	15,0	m³/s
Abfluß MQ (1926/60) oberirdisch	=	10,9	m³/s
Abfluß unterirdisch	=	4,1	m³/s

Pegel Eschenlohe:			
Mittlerer Jahresniederschlag 1665 mm	=	24,7 m³/s	
Verdunstung 460 mm	=	6,8 m³/s	
Gesamtabfluß (unter- und oberirdisch)	=		17,9 m³/s
Zusätzliche Einzugsgebiete:			
Esterberg, 5 km²			
Mittlerer Jahresniederschlag 1700 mm	=	0,28 m³/s	
Verdunstung 450 mm	=	0,07 m³/s	
Abfluß Estergebiet	=		0,21 m³/s
Krottenkopfgebiet, 10 km²			
Mittlerer Jahresniederschlag 2000 mm	=	0,65 m³/s	
Verdunstung 370 mm	=	0,12 m³/s	
Abfluß Krottenkopfgebiet	=		0,53 m³/s
Maulenbach, MQ	=		1,00 m³/s
Gesamtabfluß (unter- und oberirdisch)	=		19,64 m³/s
Abfluß, MQ (1931/1960) oberirdisch	=		18,10 m³/s
Abfluß unterirdisch	=		1,54 m³/s

Der mittlere unterirdische Abfluß beträgt nach dieser Berechnung am Pegel Garmisch-Knorrsteg 4,1 m³/s und nimmt bis Eschenlohe auf 1,5 m³/s ab. Danach würden im Mittel mindestens 2,5 m³/s aus dem unterirdischen Abfluß an die Vorfluter abgegeben.

Für das Trockenjahr 1947, in dem der Jahresniederschlag nur 70% des langjährigen Mittels betrug, ergibt sich folgende Berechnung:

Pegel Garmisch-Knorrsteg:			
Jahresniederschlag 1947, 1165 mm	=	14,50 m³/s	
Verdunstung 400 mm	=	4,96 m³/s	
Gesamtabfluß (unter- und oberirdisch)	=		9,54 m³/s
Abfluß oberirdisch 1947	=		6,39 m³/s
Abfluß unterirdisch	=		3,15 m³/s
Pegel Eschenlohe:			
Jahresniederschlag 1947, 1165 mm	=	17,3 m³/s	
Verdunstung 400 mm	=	5,9 m³/s	
Gesamtabfluß (unter- und oberirdisch)	=		11,40 m³/s
Zusätzliche Einzugsgebiete:			
Esterberg 5 km²			
Jahresniederschlag 1947, 1190 mm	=	0,20 m³/s	
Verdunstung 390 mm	=	0,06 m³/s	
Abfluß Esterberggebiet	=		0,14 m³/s
Krottenkopfgebiet 10 km²			
Jahresniederschlag 1947, 1400 mm	=	0,46 m³/s	
Verdunstung 350 mm	=	0,11 m³/s	
Abfluß Krottenkopfgebiet	=		0,35 m³/s
Maulenbach	=		0,80 m³/s
Gesamtabfluß (unter- und oberirdisch)	=		12,69 m³/s
Abfluß MQ 1947	=		11,39 m³/s
Abfluß unterirdisch	=		1,3 m³/s

Bei einer Verringerung des Jahresniederschlages um 30 % hat nach dieser Berechnung der unterirdische Abfluß bei Garmisch um 25 %, bei Eschenlohe nur um etwa 15 % abgenommen. Dämpfend auf den Abfluß bei Eschenlohe wirken die Grundwasseraufstöße zwischen Farchant und Eschenlohe.

Die mit der Wasserhaushaltsgleichung berechneten Werte für den unterirdischen Abfluß sind im Vergleich zu den nach anderen Verfahren bestimmten Werten zu niedrig. Es scheint, daß die mittlere Gebietsverdunstung mit 460 mm zu hoch angesetzt ist.

Das Einzugsgebiet der Loisach für den Pegel Eschenlohe besteht zu einem großen Teil aus steilen, kahlen Felswänden (Estergebirge, Kramer, Wettersteingebirge), an denen die Schmelz- und Regenwässer schnell ablaufen und dem Tal zugeführt werden. Dort versickern sie in den angehäuften Schuttmassen. Ein großer Teil der Niederschlagswässer wird dadurch sehr schnell der Verdunstung entzogen.

Setzt man die mittlere Verdunstung nur um 10 % geringer an, also statt 460 mm/Jahr 415 mm/Jahr, so erhöht sich der Gesamtabfluß bei Eschenlohe von 19,6 m^3/s auf 20,6 m^3/s und damit der unterirdische Abfluß von 1,5 m^3/s auf 2,5 m^3/s. Daraus ist ersichtlich, wie stark sich geringfügige Abweichungen von den in der Natur auftretenden Werten bei der Angabe von Niederschlags- und Verdunstungsdaten in der Wasserhaushaltsgleichung auswirken (vgl. R. KELLER, 1956).

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des unterirdischen Abflusses führt über Abflußmessungen an Vorflutern. In den winterlichen Frostperioden erhält die Loisach zwischen Garmisch-Knorrsteg und Eschenlohe Zuflüsse aus den Gebirgsstöcken nur über den Lahnenwiesgraben und den Gießenbach. Alle anderen Bäche werden aus Grundwasseraufstößen gespeist. Ihre Wasserführung entstammt also dem unterirdischen Abfluß, der berechnet werden kann. Nicht bekannt ist jedoch der im Untergrund verbleibende Abfluß bei Eschenlohe. Nach dem Gesetz von DARCY waren (s. S. 58) für MW 3,1 m^3/s, nach der Wasserhaushaltsgleichung 1,54 m^3/s berechnet worden (s. S. 61).

Unter der Annahme, daß die k-Werte bei Farchant und Eschenlohe ähnlich sind, was bei dem gleichartigen Untergrundaufbau anzunehmen ist, läßt sich der unterirdische Abfluß bei Eschenlohe näherungsweise bestimmen.

Das Grundwassergefälle beträgt bei MW in Farchant und in Eschenlohe etwa 4 $‰$. Die Querschnittsfläche des Grundwasserleiters ist in Eschenlohe nur ein Drittel so groß wie in Farchant. Durch die verringerte Querschnittsfläche des Grundwasserleiters bei Eschenlohe kann nur eine kleinere Wassermenge hindurchtreten als durch den Querschnitt bei Farchant. Es kommt daher zu Grundwasseraufstößen zwischen Farchant und Eschenlohe.

Am 8. 3. 1966 gelangten zwischen Farchant und Eschenlohe folgende Wassermengen aus dem unterirdischen Abfluß in die Vorfluter (Messungen der Wasserwerke der Landeshauptstadt München):

Pumpversuch	3,400 m^3/s
Ronetsbach	0,297 m^3/s
Pizikobach	0,011 m^3/s
Pöttingerbach	0,041 m^3/s
Lauterbach	0,290 m^3/s
Mühlbach	0,970 m^3/s
Zufluß vom Grundwasser zur Loisach	0,136 m^3/s
Summe	5,145 m^3/s

Diese etwa 5,0 m^3/s stellen jene Wassermenge dar, die der verringerte Querschnitt des Grundwasserleiters bei Eschenlohe nicht mehr aufzunehmen vermochte. Sie wurden an

den oberirdischen Abfluß abgegeben. Der Querschnitt des Grundwasserleiters verringert sich zwischen Farchant und Eschenlohe um zwei Drittel (vgl. Abb. 13). Diesen bei Eschenlohe fehlenden zwei Dritteln der Querschnittsfläche entstammen die berechneten 5,0 m³/s. In dem verbliebenen Drittel mußten demnach etwa 2,5 m³/s Wasser unterirdisch abfließen.

Nach derselben Berechnungsmethode ergeben sich für andere Termine folgende Werte:

25. 1. 66	2,0 m³/s
1. 2. 66	2,6 m³/s
8. 2. 66	2,25 m³/s
17. 2. 66	2,5 m³/s
8. 3. 66	2,5 m³/s
15. 3. 66	2,3 m³/s
22. 3. 66	2,3 m³/s
31. 3. 66	2,7 m³/s
5. 4. 66	3,0 m³/s

Diese Werte liegen alle in der Nähe der mit anderen Verfahren bestimmten Werte für den unterirdischen Abfluß bei Eschenlohe. Es ist daher mit einem mittleren unterirdischen Abfluß von 2–3 m³/s bei Eschenlohe zu rechnen. Wie bereits vorher erwähnt sind die Schwankungen zwischen NW-Abfluß und HW-Abfluß bei Eschenlohe gering.

Die Wassermenge, die aus dem unterirdischen Abfluß in die Vorfluter gelangte betrug am 8. 3. 1966 bei MW etwa 5,0 m³/s (s. S. 62). Rechnet man hierzu den im Untergrund verbleibenden Abfluß von 2–3 m³/s, so erhält man den unterirdischen Abfluß bei Farchant am 8. 3. 1966 mit 7–8 m³/s.

Der Zufluß vom Grundwasser zu den Vorflutern beträgt bei MW durchschnittlich 4–5 m³/s (s. Tab. 11–13), der unterirdische MW-Abfluß bei Farchant damit 6–8 m³/s.

Am 5. 12. 1962 kam es bei NW noch zu 2,3 m³/s, am 31. 1. 1963 bei NW noch zu 2,1 m³/s Grundwasseraufstößen (s. Tab. 14 und 15). Der unterirdische Abfluß bei Farchant betrug somit am 5. 12. 1962 bei Farchant etwa 4,3–5,3 m³/s, am 31. 1. 1963 4,1–5,1 m³/s.

Es ergeben sich nach den verschiedenen Berechnungsmethoden folgende Abflußwerte:

Profil	Berechnungsverfahren	HW m³/s	MW m³/s	NW m³/s	k-Wert m/s
Garmisch	Wasserhaushalt	—	4,1	3,15	—
Farchant	Abflußmessungen	—	6,0–8,0	4,1–5,1	—
D	DARCY	12,0	9,6	7,2	0,02
D	DARCY	3,2	2,5	1,9	0,0053
D	Kontinuitäts-gleichung	—	3,0–5,0	—	—
Br. 1–6	DARCY	6,0–10,0	5,0–7,5	4,5–6,5	0,02
Br. 1–6	DUPUIT/THIEM u. DARCY	3,0–5,0	2,5–3,8	4,2–3,2	0,01
26	DARCY	2,8	3,1	3,4	0,02
26	DUPUIT/THIEM u. DARCY	1,4	1,6	1,7	0,01
Eschenlohe	Wasserhaushalt	—	1,54	1,3	—
Eschenlohe	Abflußmessungen	—	2,0–3,0	—	—

Ein unterirdischer Abfluß bei MW von 2,5 m³/s am Profil D ist zu gering, da es bei MW zwischen Farchant und Eschenlohe zu Grundwasseraufstößen von 4–5 m³/s kommt. Der unterirdische Abfluß im D-Profil muß bei MW also mindestens gleich oder größer sein als 4–5 m³/s sein. Ein unterirdischer Abfluß von 9,6 m³/s ist hingegen als zu groß anzusehen, da er nicht mit den Niederschlagsverhältnissen zu vereinbaren ist.

Ein unterirdischer Abfluß von 2,5 m³/s bei MW für den Bereich der Brunnen 1–6 erscheint aufgrund der Grundwasseraufstöße ebenfalls als zu gering. Der mittlere unterirdische Abfluß bei Profil 26 bzw. bei Eschenlohe dürfte etwa dem Mittel der beiden extremen Werte entsprechen.

Freilich weisen alle angewendeten Methoden zur Bestimmung des unterirdischen Abflusses Fehlermöglichkeiten auf. Bei Berechnungen nach den Formeln von DARCY, DUPUIT-THIEM und C. v. THEIS ist die Bestimmung des k-Wertes problematisch. Bei Filtergeschwindigkeitsbestimmungen und Anwendung der Kontinuitätsgleichung ist es schwierig, eine mittlere Filtergeschwindigkeit v_f über ein größeres Profil anzugeben. Bei der Berechnung nach der Wasserhaushaltsgleichung bestehen in einem so stark gegliederten Gebiet, wie es das Einzugsgebiet der Loisach für den Pegel Eschenlohe ist, Schwierigkeiten in der

Tab. 11: Abflußverhältnisse an der Loisach zwischen Garmisch-Knorrsteg und Eschenlohe am 16. 11. 1954 bei mittleren Grundwasserständen

	Abfluß m³/s
A Loisach, Garmisch-Knorrsteg	6,640
B Loisach, Eschenlohe	12,500
B–A (Zunahme des Abflusses von A bis B)	5,860
Zufluß zur Loisach durch Bäche:	
a) Lahnenwiesgraben	0,170
b) Gießenbach	1,230
c) Ronetsbach	0,850
d) Pizikobach	0,256
e) Rörlbach	0,115
f) Pöttingerbach	—
g) Lauterbach	1,410
h) Mühlbach	1,280
insgesamt (Zufluß durch Bäche zwischen A und B)	5,311
Direkter Zufluß vom Grundwasser zur Loisach	5,860
	— 5,311
	0,549
Zufluß zur Loisach durch Bäche, die aus Grundwasseraufstößen gespeist werden (c, d, e, f, g, h)	3,911
Gesamter Zufluß vom Grundwasser der Talfüllung zur Loisach	0,549
	+ 3,911
	4,460

Ermittlung von genauen Niederschlags- und Verdunstmitteln und den Abflußmessungen sind Grenzen in der Meßgenauigkeit gesetzt.

Es ließen sich jedoch einige extreme Werte auf Grund von Messungen und Beobachtungen eindeutig ausscheiden, so die hohen Werte von 12,0 m³/s für HW, 9,6 m³/s für MW und 7,2 m³/s für NW und die niedrigen Werte von 3,2 m³/s für HW, 2,5 m³/s für MW und 1,9 m³/s für NW im Profil D sowie der geringe Wert von 2,5 m³/s bei MW im Bereich der Brunnen 1 bis 6. Es ist daher mit den in Tab. 16 angegebenen unterirdischen Abflüssen zu rechnen.

Tab. 12: Abflußverhältnisse an der Loisach zwischen Garmisch-Knorrsteg und Eschenlohe am 24. 1. 1955 bei mittleren Grundwasserständen

	Abfluß m³/s
A Loisach, Garmisch-Knorrsteg	7,450
B Loisach, Eschenlohe	14,150
B–A (Zunahme des Abflusses von A bis B)	6,700
Zufluß zur Loisach durch Bäche:	
a) Lahnenwiesgraben	0,166
b) Gießenbach	1,440
c) Ronetsbach	0,940
d) Pizikobach	0,325
e) Rörlbach	0,130
f) Pöttingerbach	—
g) Lauterbach	1,450
h) Mühlbach	1,550
insgesamt (Zufluß durch Bäche zwischen A und B)	6,001
Direkter Zufluß vom Grundwasser zur Loisach	6,700
	— 6,001
	0,699
Zufluß zur Loisach durch Bäche, die aus Grundwasseraufstößen gespeist werden (c, d, e, f, g, h)	4,395
Gesamter Zufluß vom Grundwasser der Talfüllung zur Loisach	0,699
	+ 4,395
	5,094

Tab. 13: Abflußverhältnisse an der Loisach zwischen Farchant und Eschenlohe am 15. 3. 1966 bei mittleren Grundwasserständen

	Abfluß m^3/s
A Loisach Farchant	5,045
B Loisach Eschenlohe	11,960
B–A (Zunahme des Abflusses von A–B)	6,915
Zufluß zur Loisach durch Bäche:	
a) Gießenbach	1,275
b) Ronetsbach	0,299
c) Pizikobach	0,125
d) Pöttingerbach	0,044
e) Lauterbach	0,257
f) Mühlbach	0,451
insgesamt (Zufluß durch Bäche zwischen A und B)	2,451
Direkter Zufluß vom Grundwasser zur Loisach	6,915
(3,400 m^3/s davon durch Pumpversuch gefördert und in die Loisach abgeleitet.)	— 2,451
	4,464
Zufluß zur Loisach durch Bäche, die aus Grundwasseraufstößen gespeist werden (b, c, d, e, f)	1,176
Gesamter Zufluß vom Grundwasser der Talfüllung zur Loisach	4,464
	+ 1,176
	5,640

Tab. 14: Abflußverhältnisse an der Loisach zwischen Farchant und Eschenlohe am 5. 12. 1962 bei niedrigen Grundwasserständen

	Abfluß m^3/s
A Loisach Farchant	1,945
B Loisach Eschenlohe	4,570
B–A (Zunahme des Abflusses von A–B)	2,625
Zufluß zur Loisach durch Bäche:	
a) Gießenbach	0,840
b) Ronetsbach	0,111
c) Pizikobach	0,099
d) Rörlbach	0,050
e) Lauterbach	0,849
f) Mühlbach	1,183
insgesamt (Zufluß durch Bäche zwischen A und B)	3,132
Zufluß von der Loisach zum Grundwasser	3,132
	— 2,625
	0,507
Gesamter Zufluß vom Grundwasser der Talfüllung zur Loisach = Zufluß durch Bäche, die aus Grundwasseraufstößen gespeist werden (b, c, d, e, f)	2,292

Tab. 15: Abflußverhältnisse an der Loisach zwischen Farchant und Eschenlohe am 31. 1. 1963 bei niedrigen Grundwasserständen

	Abfluß m^3/s
A Loisach, Garmisch-Knorrsteg	1,353
B Loisach, Eschenlohe	4,600
B–A (Zunahme des Abflusses von A bis B)	3,247
Zufluß zur Loisach durch Bäche:	
a) Gießenbach	1,095
b) Ronetsbach	0,126
c) Pizikobach	0,087
d) Rörlbach	0,030
e) Lauterbach	0,452
f) Mühlbach	0,893
insgesamt (Zufluß durch Bäche zwischen A und B)	2,683
Direkter Zufluß vom Grundwasser zur Loisach	3,247
	— 2,683
	0,564
Zufluß zur Loisach durch Bäche, die aus Grundwasseraufstößen gespeist werden (b, c, d, e, f)	1,588
Gesamter Zufluß vom Grundwasser der Talfüllung zur Loisach	0,564
	+ 1,588
	2,152

Tab. 16: Der unterirdische Abfluß im Loisachtal zwischen Farchant und Eschenlohe bei HW, MW und NW

	HW m^3/s	MW m^3/s	NW m^3/s
Farchant bzw. Profil D	8,0–12,0	6,0–8,0	5,0–6,0
Br. 1 bis 6	5,0–10,0	4,0–7,0	3,0–5,0
Eschenlohe bzw. Profil 26	3,0	2,0–3,0	2,0

5.3. Abflußspendenvergleiche

Die Abflußspende ist ein Maß für das Wasserdargebot eines Einzugsgebietes. Sie wird ausgedrückt in l/s km^2 und ist der Quotient aus dem an einem Pegel gemessenen Abfluß eines Einzugsgebietes (l/s) und dem dazugehörigen Niederschlagsgebiet (km^2). Bei der Berechnung der Abflußspende wird im allgemeinen nur der oberirdische Abfluß berücksichtigt, da der unterirdische Abfluß im Vergleich zum oberirdischen meist sehr gering ist und deshalb in der Berechnung vernachlässigt werden kann. In den folgenden Tabellen (Tab. 17 und 18) handelt es sich daher um Abflußspenden, die allein aus dem oberirdischen Abfluß gewonnen wurden.

Bei dem Vergleich der Abflußspenden von nordalpinen Flüssen fällt auf, daß die MQ-Abflußspenden von Isar, Loisach und Ammer am Alpenrande erheblich niedriger liegen als die der anderen Flüsse, wie z. B. der Wertach, des Lechs oder der Iller (s. Tab. 17 und 18).

Es ist unwahrscheinlich, daß die Einzugsgebiete dieser drei Flüsse anteilig wesentlich geringere Gebietsniederschläge erhalten als die östlich und westlich davon liegenden Flußgebiete. In den Tälern der Isar, Loisach und Ammer müssen also größere Grundwasserströme vorhanden sein.

Die MQ-Spende der Ammer für den Pegel Oberammergau beträgt nach dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch 1962 für das Abflußgebiet der Donau 33,4 l/s km². Aus dem Ammertal fließen über die Maulenbachquellen im Mittel 1,0 m³/s Wasser der Loisach zu, ferner verläßt ein Grundwasserstrom von unbekannter Größe das Ammertal bei Oberammergau in Richtung Norden. Der MQ-Abfluß der Ammer bei Oberammergau beträgt 3,8 m³/s. Somit ist der Gesamtabfluß des Ammertales auf jeden Fall größer als 4,8 m³/s und die Spende für das Niederschlagsgebiet von 114 km² größer als 42,1 l/s km².

Die nördlichen Kalkalpen haben hohe Jahresmittel des Niederschlages. Im Alpenvorland nimmt die Niederschlagshöhe dann ab. Es ist daher erstaunlich, daß die MQ-Abflußspende der Loisach in Farchant 26,4 l/s km², in Eschenlohe 35,8 l/s km² und am Pegel Schlehdorf 37,3 l/s km² beträgt (s. Tab. 17), obwohl die Loisach zwischen Eschenlohe und Schlehdorf Einzugsgebiete mit geringeren Niederschlägen hat, als es die Gebiete südlich Eschenlohe haben.

Ebenso bemerkenswert ist, daß die Isar in München am Pegel Prinzregentenstraße eine MQ-Spende von 32,5 l/s km² erreicht, wogegen die MQ-Spende der Isar bei Mittenwald nur 30,0 l/s km² und die Loisach, die später in die Isar mündet, bei Eschenlohe nur 35,8 l/s km² beträgt, und das, obwohl zwischen Mittenwald bzw. Eschenlohe und München Gebiete mit geringeren Niederschlägen liegen, als sie die Einzugsgebiete für die Pegel Eschenlohe und Mittenwald haben. Dies ist nur zu erklären durch größere Grundwasserströme im Isartal bei Mittenwald und im Loisachtal bei Eschenlohe.

Bei einem Vergleich der MQ-Spenden verschiedener Flüsse zeigt sich, daß die Flüsse des Allgäus, wie z. B. Iller, Trettach, Breitach und Osterach wesentlich höhere MQ-Spenden

Tab. 17: MQ-Spenden im Einzugsgebiet der Loisach
(nach Unterlagen der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München)

Abflußmeßstelle	Beobachtungs-zeitraum	MQ-Spende l/s km²
Partnach Partenkirchen	1921/1960	40,1
Loisach Garmisch-Knorrsteg	1926/1960	27,8
Loisach Farchant	1931/1960	26,4
Loisach Eschenlohe	1931/1960	35,8
Loisach Schlehdorf	1926/1960	37,3

aufweisen als die des Berchtesgadener Landes, wie Saalach, Ramsauer Ache oder Königsseer Ache. Die MQ-Spenden im Berchtesgadener Land liegen aber immer noch über 40 l/s km². Man darf daher annehmen, daß die MQ-Spenden in dem Gebiet, das zwischen dem Allgäu und dem Berchtesgadener Land liegt, nicht wesentlich niedriger liegen. Die MQ-Spenden aus unterirdischem und oberirdischem Abfluß für die Isar am Pegel Mittenwald und für die Loisach an den Pegeln Garmisch-Knorrsteg, Farchant und Eschenlohe dürften daher um oder über 40 l/s km² liegen.

Aus den niedrigen Spenden des oberirdischen Abflusses in Garmisch, Farchant und Mittenwald (s. Tab. 17) läßt sich bereits auf einen ziemlich großen unterirdischen Abfluß schließen.

Rechnet man bei Eschenlohe mit einem mittleren unterirdischen Abfluß von 2,5 m³/s, wie er vorher mit anderen Methoden bestimmt wurde, so ergibt sich für den gesamten Abfluß eine MQ-Spende von 41,2 l/s km². Dieser Wert ist sicherlich nicht zu hoch, vergleicht man ihn mit den MQ-Spenden anderer Abflußpegel, bei denen nicht einmal der unterirdische Abfluß berücksichtigt ist.

Unter der Annahme einer MQ-Spende von 41,2 l/s km² am Pegel Eschenlohe ergibt sich eine mittlere Abflußhöhe von 1280 mm und bei einer mittleren Verdunstung von 460 mm (s. S. 61) eine mittlere Niederschlagshöhe von 1740 mm oder bei einem mittleren Niederschlag von 1665 mm (s. S. 61) eine mittlere Verdunstung von 385 mm. Beide Werte, der für mittlere Verdunstung und der für mittleren Jahresniederschlag, wären in dem stark gegliederten Einzugsgebiet der Loisach für den Pegel Eschenlohe durchaus vertretbar.

Man ersieht daraus, daß in den stark gegliederten Einzugsgebieten der Flüsse in den nördlichen Kalkalpen eine Grundwasserbilanz mit der Wasserhaushaltsgleichung nur grobe Näherungswerte liefern kann.

Tab. 18: MQ-Spenden nordalpiner Flüsse
(nach: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Donaugebiet, 1963, Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München 1966)

Abflußmeßstelle	Beobachtungszeitraum	MQ-Spende l/s km²
Isar, Mittenwald-Karwendelsteg	1926/1960	30,0
Isar, München-Prinzregentenstraße	1926/1960	32,5
Ammer, Oberammergau	1921/1960	33,4
Saalach, Unterjettenberg	1901/1960	41,5
Lech, Lechbruck	1951/1960	41,6
Wertach, Maria Rain	1926/1960	41,7
Berchtesgadener Ache, Schellenberg	1931/1960	43,3
Ramsauer Ache, Ilsank	1931/1960	44,0
Iller, Krugzell	1921/1960	45,1
Vils, Pfronten-Ried	1911/1960	45,7
Lech, Füssen	1901/1950	46,1
Rißbach, Rißbachklamm	1941/1960	48,4
Iller, Kempten	1901/1960	48,5
Königsseer Ache, Schwöbbrücke	1931/1960	51,5
Trettach, Oberstdorf	1931/1960	56,7
Breitach, Breitachklamm	1951/1960	57,4
Osterach, Reckenberg	1933/1960	64,1

Neben der Auswertung von Pumpversuchen liefern Reihenabflußmessungen und Abflußspendenvergleiche mit benachbarten Flußgebieten in solchen Einzugsgebieten eindeutigere Werte.

5.4 Herkunft des Grundwassers

Die Loisach tritt nach Verlassen des Griesener Engpasses, in dem sie stellenweise auf anstehendem Fels fließt, ohne einen nennenswerten begleitenden Grundwasserstrom bei Obergrainau in den Garmischer Talkessel ein, dort beginnt ihre Infiltration ins Grundwasser. Keines der in das Loisachtal mündenden Seitentäler führt einen nennenswerten Grundwasserstrom.

Die Grundwasserneubildung geschieht also erst zwischen Obergrainau und Eschenlohe. Die zur Niederschlagsversickerung geeignete Fläche des Loisachtales bedeckt etwa 40 km². Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 1360 mm, die Verdunstung etwa 550 mm (Meßstelle Garmisch-Partenkirchen). Das entspricht, sofern die nicht verdunsteten Niederschläge ins Grundwasser gelangen, einer mittleren Grundwasserneubildung von 1,0 m³/s.

$$\frac{\text{(Niederschlag-Verdunstung)} \cdot \text{Talfläche}}{\text{Anzahl der Sekunden eines Jahres}} = \text{Grundwasserneubildung}$$

Dem steht jedoch ein unterirdischer MQ-Abfluß von 6–8 m³/sec gegenüber. Der größte Teil der Grundwasserneubildung muß also durch Versickerungen aus der Loisach, aus ihren Seitenbächen, aus den Lainen und aus Versickerung von Niederschlägen im Talkessel erfolgen, wie sich dies aus Reihenabflußmessungen bestätigen läßt. Diese Versickerung wiederum geschieht im Frühjahr durch die Schneeschmelze und im Sommer durch die Niederschläge.

Vom Krepbach westlich Garmisch-Partenkirchen liegen von mehreren Meßstellen Abflußmessungen des Wasserwirtschaftsamtes Weilheim vor. Es handelt sich um sieben Meßstellen. Zwischen Meßstelle 4 und 6 mündet der Brücklesbach, an dem die Meßstelle 5 liegt. Der Krepbach verliert zwischen den Meßstellen 2 und 8 teilweise mehr als 0,1 m³/s Wasser, die zur Grundwasserneubildung beitragen (s. Tab. 19). Auch der Kankerbach verliert zwischen den Meßstellen 18 und 21 einen großen Teil seines Abflusses in den Untergrund (s. Tab. 20).

Ähnlich wie Kankerbach und Krepbach verlieren andere Bäche wie Hammersbach, Degernlaine und Partnach einen Teil ihrer Wässer in den Untergrund. Die meisten der

Tab. 19: Reihenabflußmessungen vom Krepbach

Datum	Meßstelle						
	1 l/s	2 l/s	3 l/s	4 l/s	5 l/s	6 l/s	8 l/s
18. 12. 47	90	163	148	—	—	592	—
20. 1. 48	84	348	257	—	—	—	—
23. 4. 52	100	306	306	—	522	491	—
23. 5. 52	66	229	203	233	496	437	403
4. 8. 52	59	213	336	232	459	442	432
1. 10. 52	76	328	290	296	486	498	452
21. 1. 53	66	162	197	192	412	428	357

Tab. 20: Reihenabflußmessungen vom Kankerbach

Datum	Meßstelle					
	17 l/s	18 l/s	19 l/s	19a l/s	20 l/s	21 l/s
22. 8. 51	83	226	236	—	245	123
5. 10. 51	—	168	160	—	143	133
23. 10. 51	—	155	143	—	132	—
20. 12. 51	14	91	—	132	122	107
23. 5. 52	80	270	—	283	218	—
6. 8. 52	28	173	—	203	127	—
25. 9. 52	76	282	—	272	237	—
17. 11. 52	—	—	—	373	344	—
21. 1. 53	30	178	—	188	148	—

von den Bergen herabfließenden Wildbäche münden nicht in die Loisach, sondern versickern vorher im Schutt. So erreicht der Kuhfluchtgraben mit seinen Abflüssen, die über 2 m³/s betragen können, nur selten die Loisach. Er versickert vorher in dem von ihm selbst angehäuften Schuttkegel. Ähnliche Verhältnisse herrschen an der Fahrmannslaine, an der Schindlerlaine und an der Archtallaine.

Aus den Reihenabflußmessungen ergibt sich, daß auch die Loisach auf der Strecke von Garmisch bis Farchant größere Mengen Wasser an den unterirdischen Abfluß abgibt. Es sind teilweise mehrere m³/s.

In den Abflußmessungen der Tabelle 21 ist der Zufluß zur Loisach durch den Lahnenwiesgraben nicht berücksichtigt, da keine Messungen vorliegen. Dadurch sind die Versickerungswerte etwas zu gering.

Bei den aus Tabelle 21 ersichtlichen Versickerungen handelt es sich um herausgegriffene Werte des winterlichen Abflusses. Sie kommen meist dadurch zustande, daß nach längeren Frostperioden mit geringen Abflüssen der Loisach und niedrigem Grundwasserstand starkes Tauwetter einsetzt, das zu einem plötzlichen Hochwasser der Loisach führt. Dann werden dem tiefliegenden Grundwasser größere Wassermengen durch Versickerungen aus der Loisach zugeführt.

So stieg nach Unterlagen der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München, der Abfluß der Loisach am Pegel Garmisch-Knorrsteg im Januar 1954 innerhalb von zwei Tagen (21./22. 1. 1954) von 3,75 m³/s auf 23,7 m³/s, nachdem er fast zwei Monate lang weniger als 4 m³/s betragen hatte. Dabei kam es zu größeren Versickerungen aus der Loisach (s. Tab. 21), wobei der Wert von 6 m³/s allerdings etwas hoch erscheint. Vom 22. 3. bis zum 26. 3. 1955 stieg die Wasserführung der Loisach am Pegel Garmisch-Knorrsteg von 3,72 m³/s auf 34,6 m³/s, nachdem sie, wie aus Unterlagen der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München, ersichtlich ist, länger als einen Monat weniger als 3 oder 4 m³/s betragen hatte. Die Versickerungen zwischen Garmisch-Knorrsteg und Farchant erreichten 2,0 m³/s.

Selbst bei mittleren Grundwasserständen kam es zu Beginn des Jahres 1966 nach Messungen der Wasserwerke München zwischen Garmisch-Knorrsteg und Farchant teilweise zu Versickerungen von mehr als 1,5 m³/s aus der Loisach (s. Tab. 22).

Aus den aufgeführten Beispielen ist ersichtlich, daß es zwischen dem Pegel Garmisch-Knorrsteg und dem Pegel Farchant zu teilweise erheblichen Versickerungen von Wasser

Tab. 21: Reihenabflußmessungen der Loisach ohne Berücksichtigung des Lahnenwiesgrabens (nach Unterlagen der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München)

Datum	Loisach/Garmisch m³/s	Loisach Farchant m³/s	Versickerung m³/s
1. 11. 53	5,0	3,40	1,60
7. 11. 53	5,89	3,88	2,01
14. 11. 53	4,50	3,22	1,28
21. 11. 53	4,25	3,22	1,03
28. 11. 53	4,00	3,04	0,96
17. 1. 54	4,50	1,00	3,50
21. 1. 54	15,50	9,50	6,00
25. 2. 54	2,84	1,78	1,06
26. 2. 54	2,84	1,00	1,84
27. 2. 54	3,00	1,00	2,00
28. 2. 54	3,25	1,00	2,25
1. 3. 54	3,75	1,60	2,15
23. 12. 54	8,92	6,81	2,11
16. 2. 58	19,50	17,90	1,6
1. 3. 60	16,20	14,40	1,8
11. 12. 61	13,80	11,10	2,7

Tab. 22: Reihenabflußmessungen der Loisach unter Berücksichtigung des Lahnenwiesgrabens (nach Messungen der Wasserwerke der Landeshauptstadt München)

	1	2	3	4	5
Datum	Garmisch-Knorrsteg m³/s	Lahnenwies-graben m³/s	1+2 m³/s	Farchant m³/s	Versickerung m³/s
25. 1. 66	2,050	0,132	2,182	1,778	0,404
1. 2. 66	4,580	0,491	5,071	4,800	0,271
15. 2. 66	7,265	0,270	7,535	6,010	1,525
17. 2. 66	6,625	0,240	6,865	5,245	1,620
8. 3. 66	5,960	0,257	6,217	4,935	1,282
15. 3. 66	5,755	0,197	5,952	5,045	0,907
22. 3. 66	5,725	0,296	6,021	5,575	0,446

aus der Loisach ins Grundwasser kommt. Ein völliges Austrocknen der Loisach tritt jedoch nicht ein, da das Flußbett teilweise abgedichtet ist. Ähnliche Verhältnisse werden von W. Koehne (1948) vom Schlachtensee im Grunewald bei Berlin und von der Ruhr bei Ruhrort geschildert.

In den Monaten November und Dezember des Jahres 1953 kam es durchgehend zu Versickerungen zwischen Garmisch-Knorrsteg und Farchant. Die mittlere Versickerung betrug ohne Berücksichtigung des Lahnenwiesgrabens 1,33 m³/s im November und 0,64 m³/s im Dezember (s. Tab. 23).

Es ist anzunehmen, daß es außer zwischen Garmisch-Knorrsteg und Farchant auch zu Versickerungen aus der Loisach zwischen dem Griesener Paß und Garmisch-Knorrsteg kommt.

Die Versickerung in den Frühjahrs- und Sommermonaten dürfte die der Wintermonate erheblich übersteigen, wie der starke Anstieg der Grundwasseroberfläche im Gebiet von Garmisch-Partenkirchen während des Frühjahrs und des Sommers zeigt (s. Abb. 25).

Neben der Grundwasserneubildung durch Versickerung von Niederschlägen und der Infiltration aus der Loisach und aus Bächen kommt es stellenweise zur Einspeisung von Wasser aus der Felsumrandung der Talfüllung (s. S. 50). Es dürfte sich jedoch nur um geringfügige Mengen handeln.

Tab. 23: Reihenabflußmessungen an der Loisach im November und im Dezember 1953 (nach Unterlagen der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München)

Datum	November 1953			Dezember 1953		
	Garm. Kn. m^3/s	Farcht. m^3/s	Versickg. m^3/s	Garm.Kn. m^3/s	Farcht. m^3/s	Versickg. m^3/s
1	5,00	3,40	1,60	4,00	2,86	1,14
2	5,00	3,40	1,60	4,00	2,86	1,14
3	5,00	3,40	1,60	4,00	2,86	1,14
4	5,00	3,40	1,60	3,75	2,86	0,89
5	5,00	3,40	1,60	3,75	2,86	0,89
6	5,50	3,88	1,62	3,75	3,04	0,71
7	5,89	3,88	2,01	3,75	2,86	0,89
8	5,50	3,64	1,86	3,75	2,86	0,89
9	5,25	3,40	1,85	3,50	3,04	0,46
10	5,00	3,40	1,60	3,50	2,86	0,64
11	5,00	3,40	1,60	3,50	2,86	0,64
12	5,00	3,40	1,60	3,50	2,68	0,82
13	4,75	3,40	1,35	3,50	2,86	0,64
14	4,50	3,22	1,28	3,50	2,86	0,64
15	3,50	3,22	1,28	3,50	2,86	0,64
16	4,50	3,22	1,28	3,50	2,86	0,64
17	4,50	3,22	1,28	3,25	2,86	0,39
18	4,50	3,22	1,28	3,25	2,50	0,75
19	4,50	3,22	1,28	3,25	2,50	0,75
20	4,25	3,22	1,03	3,50	2,86	0,64
21	4,25	3,22	1,03	3,25	2,86	0,39
22	4,00	2,04	0,96	3,25	2,86	0,39
23	4,00	3,04	0,96	3,25	2,68	0,57
24	4,00	3,04	0,96	3,25	2,68	0,57
25	4,00	3,04	0,96	3,25	2,68	0,57
26	4,00	3,04	0,96	3,25	2,68	0,57
27	4,00	3,04	0,96	3,00	2,68	0,32
28	4,00	3,04	0,96	3,00	2,68	0,32
29	4,00	3,04	0,96	3,00	2,68	0,32
30	4,00	2,86	1,14	3,00	2,68	0,32
31				2,84	2,50	0,3

6. Hydrologische Zusammenhänge im Grundwasser der Talfüllung

Vom Talkessel Garmisch-Partenkirchen bis Farchant zieht ein einziger zusammenhängender Grundwasserkörper mit freiem Spiegel. Dieser Teil des Loisachtales ist ein Gebiet mit bevorzugter Grundwasserneubildung, die überwiegend durch Versickerungen aus Flüssen und Bächen erfolgt. Die Versickerungen aus der Loisach (s. S. 72) sind am größten, wenn die Loisach bei niedrigen Grundwasserständen Hochwasser führt, weil in dieser Zeit ein starkes Sickerwassergefälle von der Loisach zum Grundwasser besteht. Durch die Versickerungen steigt der Grundwasserspiegel an, und die Versickerungsstrecke südlich Farchant wird kürzer (vgl. Abb. 24). Je höher der Grundwasserspiegel steigt, desto weiter nach Süden verschiebt sich der Punkt, südlich dessen die Loisach Wasser an das Grundwasser abzugeben vermag und nördlich dessen das Grundwasser in die Loisach einspeisen kann.

Die Talfüllung kann im Frühjahr und im Sommer schnell große Wassermengen von Niederschlägen und von Vorfluterinfiltrationen aufnehmen. Auf Grund der großen Durchlässigkeit der Talfüllung wird diese Grundwasserzugabe ebenso schnell wieder durch Grundwasseraufstöße oder durch erhöhten Grundwasserabfluß abgeführt.

Nördlich Farchant werden die Grundwasserverhältnisse komplizierter. Eine bis zu 20 m mächtige Seetonlage trennt den bisher zusammenhängenden Grundwasserleiter in zwei Stockwerke. Durch die Aufteilung in zwei Grundwasserstockwerke und durch die Verengung des Talquerschnittes von Süden nach Norden wird das Aufnahmevermögen des Grundwasserleiters verringert; dadurch kommt es zu Grundwasseraufstößen, so z. B. an Ronetsbach, Lauterbach und Mühlbach. Hier wird Grundwasser an die Vorfluter abgegeben. Bei Oberau jedoch liegt die Oberfläche des ersten Grundwasserstockwerkes meist tiefer als die Loisach, und es wird Flußwasser in das erste Stockwerk eingespeist.

Das erste Grundwasserstockwerk wird also durch verschiedene Anteile gespeist: durch versickernde Niederschläge, durch Aufstöße aus dem zweiten Grundwasserstockwerk, durch versickernde Bäche, wie Kuhfluchtgraben, Fahrmannslaine und Schindlerlaine und bei Oberau durch Versickerungen aus der Loisach.

Das zweite Grundwasserstockwerk wird gespeist durch Versickerung von Niederschlägen (südlich Farchant), durch Versickerungen aus Bächen und Flüssen und durch Einspeisungen aus der felsigen Talumrandung (s. S. 50).

Die Grundwasseroberfläche des ersten und der Druckspiegel des zweiten Grundwasserstockwerkes liegen von Farchant bis zur Meßstelle 1/a nahe beieinander, und zwar nicht nur während der mittleren Wasserstände im unbeeinflußten Zustand am 10. 1. 1966, sondern auch während des Großpumpversuches, während der größten Absenkung am 19.3.1966 (s. Beilage 2).

Daraus muß geschlossen werden, daß die Seetondecke zwischen Farchant und Oberau eine Anzahl von Unterbrechungen aufweist, durch die ein Ausgleich der Grundwasserspiegel des ersten und des zweiten Stockwerkes möglich ist. Erst nördlich von Gut Buchwies weichen der freie Grundwasserspiegel des ersten und der Druckspiegel des zweiten Grundwasserstockwerkes deutlich voneinander ab. Der Druckspiegel des zweiten Grundwasserstockwerkes liegt hier im unbeeinflußten Zustand weitgehend über der Grund-

wasseroberfläche des ersten Stockwerkes, da die trennende Seetondecke im zweiten Stockwerk eine Spannung bewirkt.

Von Farchant bis Oberau und im Gebiet zwischen dem Querprofil 3 und Eschenlohe liegt die Grundwasseroberfläche bei mittleren und niedrigen Wasserständen der Loisach höher als der Flußspiegel: Das erste Grundwasserstockwerk speist in die Loisach ein (s. Abb. 34 und 35).

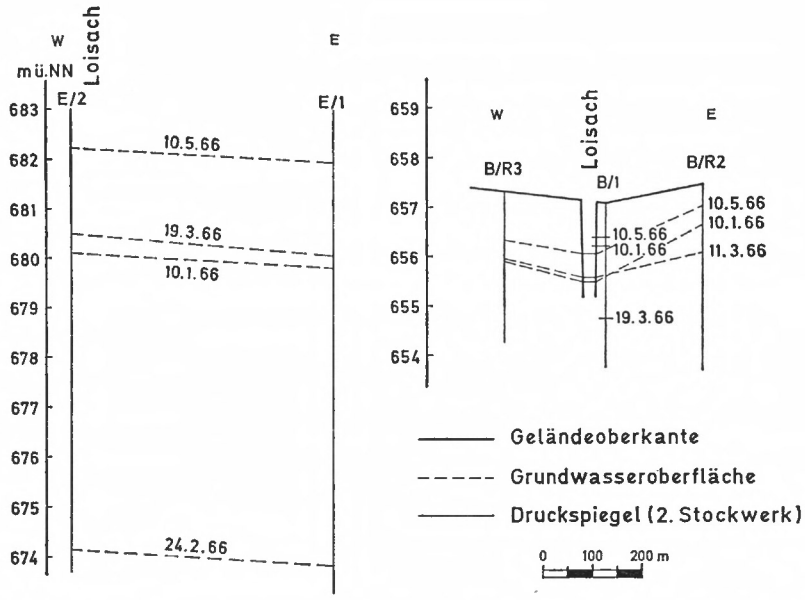


Abb. 34: Grundwasseroberfläche und Druckspiegel in den Profilen E und B. Im Profil E liegt die Geländeoberkante mehrere Meter über dem höchsten Grundwasserstand

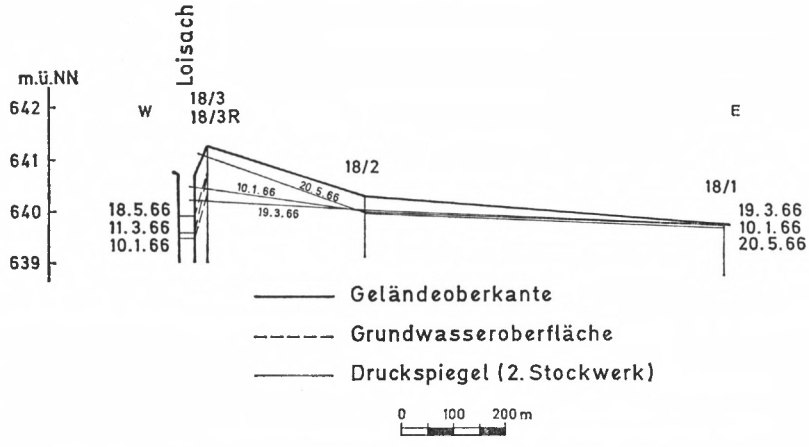


Abb. 35: Grundwasseroberfläche und Druckspiegel im Profil 18

Südlich von Farchant und bei Oberau (s. Abb. 34, 36 und 37) weist die Grundwasseroberfläche im Querprofil ein Gefälle zu den Talrändern auf. Hier speist die Loisach in das Grundwasser ein.

Im Querprofil 3 (Abb. 38) speist die Loisach bei hohen Flußwasserständen in das erste Grundwasserstockwerk ein (20. 5. 1966). Am 10. 1. 1966 erhielt die Loisach bei mittleren

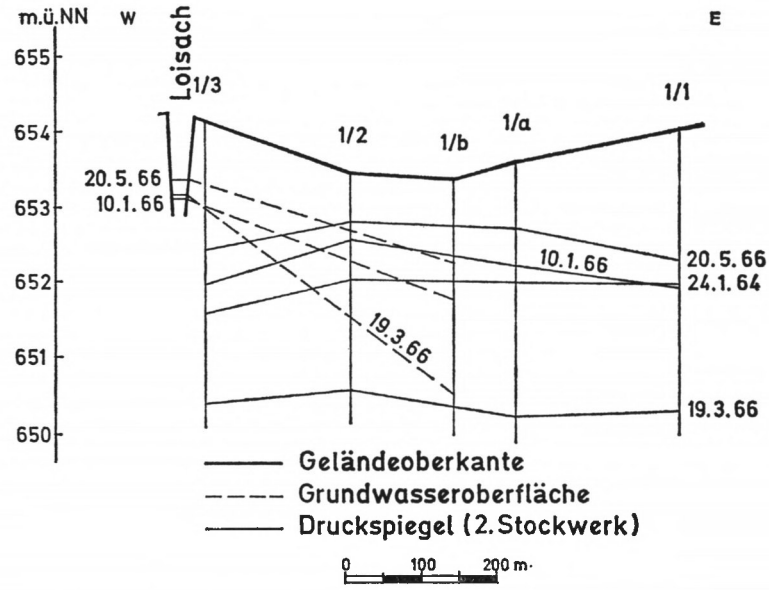


Abb. 36: Grundwasseroberfläche und Druckspiegel im Profil 1

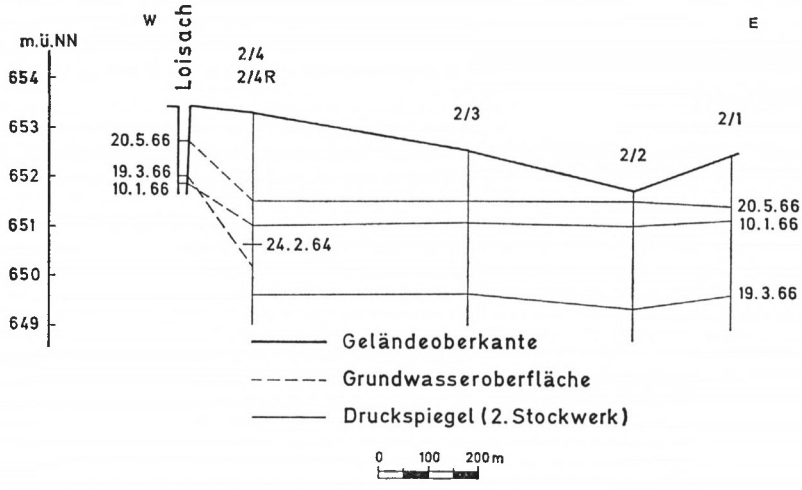


Abb. 37: Grundwasseroberfläche und Druckspiegel im Profil 2

Grundwasserständen Zufluß aus dem ersten Grundwasserstockwerk. Durch den Großpumpversuch war das erste Stockwerk an der Meßstelle 3/5R am 19. 3. 1966 jedoch so weit abgesenkt, daß ein starkes Gefälle zwischen Loisach und dem Grundwasser an der Meßstelle 3/5R auftrat. Die Loisach speiste wieder in das erste Grundwasserstockwerk ein. Auch an den Querprofilen 1 und 2 (Abb. 36 und 37) hatte sich durch den Pumpversuch die Einspeisung von Flußwasser in das Grundwasser verstärkt.

So wirkt die Loisach regulierend auf den Grundwasserhaushalt ihrer angrenzenden Talgebiete. Es besteht ein Schwankungsregime zwischen Grundwasser und Flußwasser. Bei hohen Grundwasserständen nimmt die Loisach Grundwasser auf, bei niedrigen speist sie in das Grundwasser ein. Diese Tatsache sei am Beispiel zweier Reihenabflußmessungen erläutert:

Der Abfluß der Loisach in Garmisch betrug am 25. 1. 1966 2050 l/s, in Farchant 1778 l/s[1]). Zwischen den beiden Abflußmeßstellen brachte der Lahnenwiesgraben 132 l/s in die Loisach. Statt 2050 l/s + 132 l/s = 2182 l/s betrug der Abfluß in Farchant nur 1778 l/s. 404 l/s waren versickert.

Von Farchant bis zum Pegel Oberau flossen der Loisach 175 l/s aus Bächen zu. Statt, wie zu erwarten 1778 l/s + 175 l/s = 1953 l/s, betrug der Abfluß in Oberau 4630 l/s. Der Loisach wurden also 4630 l/s — 1953 l/s = 2677 l/s Grundwasser zugeführt, davon waren 1395 l/s durch den Pumpversuch gefördertes Grundwasser und 1282 l/s direkter Zufluß vom Grundwasser zur Loisach.

Von Oberau bis Eschenlohe flossen der Loisach 2369 l/s aus Bächen und 1150 l/s beim Pumpversuch gefördertes Grundwasser zu. Statt, wie zu erwarten 4630 l/s + 2369 l/s + 1150 l/s = 8149 l/s, betrug der Abfluß in Eschenlohe 7280 l/s. Das bedeutet, daß die Loisach zwischen Oberau und Eschenlohe 8149 l/s — 7280 l/s = 869 l/s an das Grundwasser abgegeben hatte. Am 25. 1. 1966 wurden durch den Pumpversuch 2,5 m³/s Grundwasser aus dem zweiten Grundwasserstockwerk gefördert.

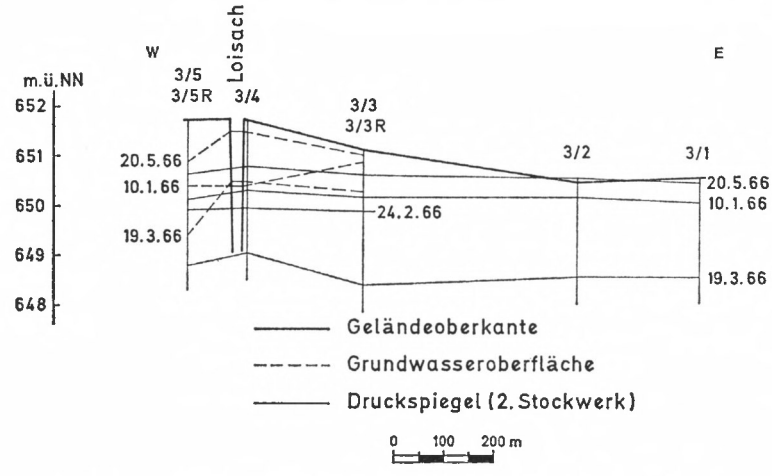


Abb. 38: Grundwasseroberfläche und Druckspiegel im Profil 3

Am 22. 3. 1966 wurden beim Pumpversuch 3,4 m³/s Grundwasser aus dem zweiten Stockwerk entnommen. Mit Abflußmessungen der Wasserwerke München ergeben sich für diesen Tag folgende Berechnungen: Von Garmisch, wo der Abfluß 5775 l/s betrug, bis Farchant floß der Lahnenwiesgraben mit 296 l/s in die Loisach. Statt, wie zu erwarten 5775 l/s + 296 l/s = 6071 l/s, betrug der Abfluß in Farchant nur 5575 l/s. 6071 l/s — 5575 l/s = 496 l/s waren versickert.

Von Farchant bis Oberau flossen der Loisach 480 l/s aus Bächen und 1790 l/s durch Einleitung von Grundwasser, das beim Pumpversuch gefördert wurde, zu. Statt der erwarteten 5575 l/s + 480 l/s + 1790 l/s = 7845 l/s wurden in Oberau 8800 l/s gemessen. Das bedeutet, daß zwischen Farchant und Oberau 8800 l/s — 7845 l/s = 955 l/s direkt aus dem Grundwasser in die Loisach gelangt sind.

Von Oberau bis Eschenlohe flossen der Loisach 1965 l/s durch Bäche zu und 1605 l/s durch Einleitung von Grundwasser, das beim Pumpversuch gefördert wurde. Somit hätte

[1] Bei den Abflußangaben werden einzelne l/s berücksichtigt, obwohl die Meßgenauigkeit dazu nicht ausreicht, damit der Gang der Berechnung ersichtlich ist.

der Abfluß in Eschenlohe 8800 l/s + 1965 l/s + 1605 l/s = 12370 l/s betragen müssen. Es wurden jedoch nur 11350 l/s gemessen. Das bedeutet, daß 12370 l/s — 11350 l/s = 1020 l/s Wasser von der Loisach an das Grundwasser abgegeben wurden.

Wie aus den vorangegangenen Berechnungen hervorgeht, wurde durch die Erhöhung der Entnahme beim Pumpversuch von 2,5 m^3/s auf 3,4 m^3/s der direkte Zufluß vom Grundwasser zur Loisach zwischen Farchant und Oberau von 1282 l/s am 25. 1. 1966 auf 955 l/s am 22. 3. 1966 verringert und die Infiltration von der Loisach zum Grundwasser zwischen Oberau und Eschenlohe von 869 l/s am 25. 1. 1966 auf 1020 l/s am 22. 3. 1966 erhöht.

Durch die Erhöhung der Entnahme von Grundwasser beim Pumpversuch war der Druckspiegel des zweiten Stockwerkes und zum großen Teil auch die Grundwasseroberfläche des ersten Stockwerkes weiter abgesenkt worden. Dadurch wurde die Einspeisung von Grundwasser in die Loisach zwischen Farchant und Oberau verringert und die Infiltration von der Loisach ins Grundwasser zwischen Oberau und Eschenlohe verstärkt.

Bei Eschenlohe werden in das erste und in das zweite Grundwasserstockwerk verhältnismäßig warme, sulfatreiche Wässer aus der felsigen Talumrandung und vermutlich auch aus einem tieferen Grundwasserstockwerk eingespeist. Sie führen, wie z. B. an der Meßstelle 26/4, zu einer Erwärmung und Aufhärtung des Grundwassers.

Der Gang des Druckspiegels im zweiten Grundwasserstockwerk läuft weitgehend parallel zum Loisachwasserspiegel, wie z. B. in den Meßstellen A/2 und 3/3 (s. Abb. 26). Ausnahmen bestehen im Gebiet des Brunnens 1, das durch den Kuhfluchtgraben beeinflußt wird (s. Abb. 27).

Der Einfluß der Loisach auf den Druckspiegel ist von Farchant bis zur Meßstelle 7/3 etwa gleichbleibend. Von der Meßstelle 7/3 nach Norden wird die Beeinflussung durch Schwankungen der Loisachwasserführung schwächer. Erst im Bereich von Eschenlohe reagiert das zweite Grundwasserstockwerk wieder stärker auf die Loisachwasserführung. Das Gebiet zwischen den Meßstellen 7/3 und 18/3 scheint daher weiter von den Stellen entfernt zu liegen, an denen Verbindungen zwischen der Loisach und dem zweiten Grundwasserstockwerk bestehen.

Das erste Grundwasserstockwerk ist zwischen Oberau und Eschenlohe, wie bereits erwähnt, mit Ausnahme der Talränder völlig vom zweiten Stockwerk getrennt. Daher zeigen die Ganglinien der Meßstellen im ersten Grundwasserstockwerk, wie z. B. der Meßstelle 7/3R (s. Abb. 26), hier keine Beeinflussung durch Pumpversuche im zweiten Grundwasserstockwerk an den Brunnen 1–6. Auch zeichnen sie den Gang des Druckspiegels des zweiten Stockwerkes nicht ab.

Fast alle Spiegelschwankungen im ersten Stockwerk zwischen Farchant und Oberau sind konform mit denen im zweiten Stockwerk. An einigen Meßstellen (A/4, A/4R; 2/4, 2/4R; 3/5, 3/5R) liegen beide Wasserspiegel nahezu auf der gleichen Höhe, obwohl die Aufschlußbohrungen Seetonlagen angetroffen hatten. In der Nähe dieser Meßstellen müssen Unterbrechungen in der Seetondecke vorhanden sein, durch die ein Ausgleich beider Spiegel möglich ist. Zwischen Farchant und Oberau werden die beiden Grundwasserstockwerke durch eine Seetondecke getrennt, die stellenweise fensterartig durchbrochen ist.

Da sich der Talquerschnitt von Süden nach Norden verringert und damit auch die Aufnahmefähigkeit des Grundwasserleiters im zweiten Stockwerk, gelangt das Grundwasser im zweiten Stockwerk unter kräftigen Druck. Dort, wo die Seetondecke unterbrochen ist, tritt eine Entlastung des unteren gespannten Stockwerkes ein, indem Wasser durch die fensterartigen Unterbrechungen der Seetondecke an das erste Stockwerk abgegeben wird. Dadurch übertragen sich die Schwankungen des Druckes im zweiten Stockwerk auch auf das erste Stockwerk, wenn auch etwas abgeschwächt. Der Druck im zweiten Stockwerk

erfährt nur in beschränktem Maße eine Entlastung durch die Fenster in der Seetondecke. Im ersten Stockwerk dagegen ist ein Ausgleich möglich, da der Speicherraum nicht begrenzt ist. So stellen sich, selbst an den Stellen, wo die Seetondecke durchbrochen ist, zum Teil verschiedene Höhen der Wasserspiegel ein (s. Abb. 37, Meßstellen 2/4 und 2/4R).

Eine Angabe über die in der Talfüllung zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe gespeicherte Wassermenge ist nur mit Einschränkungen möglich. Eine genaue Berechnung des Volumens des Speicherraumes ist nicht möglich, da nicht alle Aufschlußbohrungen die Grundwassersohle erreichten und da über den Aufbau der Talfüllung des Talkessels bei Garmisch-Partenkirchen zu wenig bekannt ist. Unter Zugrundelegung einer Fläche von etwa 30 km^2 und einer durchschnittlichen Mächtigkeit des Grundwasserleiters von 40 m ergibt sich unter Annahme eines mittleren Porenvolumens von 0,2 eine gespeicherte Wassermenge von $24 \cdot 10^7$ m^3.

Während des Großpumpversuches 1966 wurde ein Teil des Speicherraumes im ersten Grundwasserstockwerk geleert. Das bedeutet jedoch nicht, daß Wasser aus dem ersten Stockwerk entnommen wurde. Die Absenkung der Grundwasseroberfläche wurde dadurch hervorgerufen, daß die Zufuhr von Grundwasser aus dem zweiten Stockwerk in das erste Stockwerk verringert wurde.

Außer dieser Folgeerscheinung kam es durch die Entnahme aus dem zweiten Grundwasserstockwerk zu keiner Entleerung eines Speicherraumes. Die entnommene Wassermenge konnte völlig durch den unterirdischen Zufluß gedeckt werden.

7. Zusammenfassung

Bei den hydrogeologischen Untersuchungen im Einzugsgebiet der Loisach zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe/Obb. wurde drei Gebieten besondere Aufmerksamkeit gewidmet:

Den hydrologischen Verbindungen zwischen den teilweise verkarsteten Gebirgsstöcken und der Talfüllung,
den hydraulischen Zusammenhängen zwischen den Vorflutern und dem Grundwasser und dem Wasserhaushalt im Loisachtal zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe.

Zur Klärung der hydrogeologischen Verhältnisse zwischen den Gebirgsstöcken, die das Loisachtal umranden, und der Talfüllung wurden zunächst die Geologie und die Stratigraphie des Gebietes bearbeitet. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Gesteinseinheiten und den in ihnen zirkulierenden Wässern wurde studiert.

Die Abgrenzung des Einzugsgebietes der Loisach für den Pegel Eschenlohe zeigte, daß dieser Pegel ein Einzugsgebiet hat, das größer ist als das dazugehörige Niederschlagsgebiet. Einige Gebiete, die jenseits der Wasserscheiden der Loisach liegen, entwässern unterirdisch zur Loisach. Solche Gebiete sind: Der östliche Teil des Ammertales, der über die Maulenbachquellen im Mittel 1,0 m^3/s Wasser an die Loisach abgibt und ein etwa 10 Quadratkilometer großes Karstgebiet am Krottenkopf, das zur Kuhfluchtquelle und damit zur Loisach entwässert und im Mittel etwa 0,5 m^3/s Wasser dem Loisachtal zuführt. Weitere Gebiete mit unterirdischem Abfluß zur Loisach liegen an der Esterbergalm, am Plansee und am Südrand des Wettersteingebirges; sie sind jedoch von untergeordneter Bedeutung. Im übrigen stimmen die Grenzen von Niederschlags- und Einzugsgebiet im wesentlichen überein.

Die Abflußverhältnisse in dem verkarsteten Krottenkopfgebiet waren bisher ungeklärt und es wurde deshalb ein Doppelfärbeversuch mit den beiden Farbstoffen Uranin und Sulforhodamin-G-extra angesetzt. An der Umrandung des Krottenkopfmassivs sollte an zahlreichen Beobachtungsstellen eine etwaige Farbstoffindikation erfaßt werden.

Bei der Probenuntersuchung konnten die beiden eingespeisten Farbstoffe nur an der Kuhfluchtquelle nachgewiesen werden. An keiner der anderen sechzehn Beobachtungsstellen trat eine Farbindikation auf. Bei der hohen Wiedergewinnung der Farbstoffe an der Kuhfluchtquelle kann man annehmen, daß der überwiegende Teil der im Karstgebiet am Krottenkopf versickerten Wässer zur Kuhfluchtquelle gelangt. Der unterirdische Abfluß des Krottenkopfgebietes erfolgt also im verkarsteten Plattenkalk längs der Achse der Krottenkopfmulde zur Kuhfluchtquelle. Ein Einfluß ausgeprägter Hauptkluftrichtungen auf die unterirdischen Abflußwege konnte nicht festgestellt werden.

Die Probennahme erfolgte zum überwiegenden Teil mit Aktivkohlesäckchen, die nach einem festgelegten Zeitplan in Quellen und Bäche eingehängt und entnommen wurden und die etwa auftretende Farbspuren absorbieren sollten. Die Aktivkohleproben wurden mit einem Gemisch aus Kalilauge und Äthanol eluiert und das Eluat wurde in einem Fluorometer auf Farbspuren untersucht. Die an einigen Quellen, so z. B. an der Kuhfluchtquelle und an der Esterbergquelle, auch entnommenen Wasserproben wurden ebenfalls

mit einem Fluorometer untersucht. Es zeigte sich, daß man, sofern die Fluoreszenzspektren genügend weit auseinanderliegen, durchaus mehrere Farbstoffe gleichzeitig einsetzen und diese in den Proben mit Filterkombinationen in einem Fluorometer nachweisen kann.

Bei den Untersuchungen der Quellen, die von der Umrandung des Loisachtales zur Loisach hin austreten, konnten vier Quelltypen unterschieden werden: 1. Schuttquellen, ihr Chemismus und ihre Temperaturen sind stark abhängig von der Aufenthaltsdauer der Wässer im Untergrund; sie fließen ganzjährig mit relativ geringen Schüttungsschwankungen. 2. und 3. Hauptdolomit- und Plattenkalkquellen; ihr Chemismus und ihre Temperaturen sind ähnlich; die Gesamthärte der Plattenkalkwässer ist jedoch meist etwas geringer als die der Hauptdolomitquellen. Das Wasser im stark verkarsteten Plattenkalk fließt nämlich sehr schnell ab und kann daher nicht so viele Ionen im Austausch aufnehmen wie im Hauptdolomit. Die Schüttung der Plattenkalkquellen schwankt wesentlich stärker als die der Hauptdolomitquellen, doch versiegen beide Quelltypen in trockenen Jahreszeiten meistens; 4. Quellen aus Kössener-Schichten sind meist kleine Sickerstellen mit Wässern geringer Gesamthärte und witterungsabhängiger Temperaturen.

Die hydrogeologischen Untersuchungen im Talbereich zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe zeigten, daß die Grundwasserverhältnisse ziemlich kompliziert sind. Über den Aufbau des Grundwasserleiters in seiner Abhängigkeit von der Tiefe konnte an Hand verschiedener Horizontalschnitte in Verbindung mit einigen geologischen Profilen ein genaues Bild gewonnen werden. Es gibt uns einen Einblick in den Aufbau der Talfüllung und vermittelt uns eine Vorstellung über die quartäre Talbildung.

Von Garmisch-Partenkirchen bis Farchant zieht ein Grundwasserstrom mit freiem Spiegel. Im weiteren Verlauf des Tales wird dieses einzige Grundwasserstockwerk bis Eschenlohe durch eine trennende Seetondecke in zwei Grundwasserstockwerke aufgeteilt: in ein oberes erstes Grundwasserstockwerk mit freiem Grundwasserspiegel und in ein unteres zweites Grundwasserstockwerk mit gespanntem Wasser.

Wenn auch die trennende Seetondecke bereichsweise durchbrochen ist, so ist doch selbst in diesen Zonen eine Aufteilung in zwei Stockwerke erkennbar; Vergleiche von Grundwasseroberflächen mit Druckspiegeln und von Grundwasserstandsganglinien zeigen dies deutlich.

Während der Pumpversuche fielen einige Bäche trocken und das erste Grundwasserstockwerk wurde stellenweise deutlich abgesenkt. Auch daraus ist ersichtlich, daß der Seeton zwischen den beiden Grundwasserstockwerken streckenweise fensterartig durchbrochen ist. Durch eine Verringerung der Querschnittsfläche des Grundwasserleiters von Süden nach Norden kommt es durch diese Fenster hindurch zu Grundwasseraufstößen, die zu einer Dämpfung der Amplituden der Grundwasserstandsganglinien im Norden des Tales führen.

Aus tabellarischen Auswertungen von Reihenabflußmessungen ergab sich, daß ein Schwankungsregime zwischen dem Grundwasser und den Vorflutern besteht. Wir wissen jetzt, daß die Loisach zwischen Garmisch-Partenkirchen und Farchant zeitweise größere Wassermengen an das Grundwasser abgibt. Einerseits speist die Loisach ins Grundwasser ein, andererseits wird ihr durch eine Anzahl von Bächen, die ihr Wasser aus Quellaufstößen erhalten, oder aus den beiden Grundwasserstockwerken direkt, Grundwasser zugeführt. Dieses komplizierte Schwankungsregime konnte bis in seine Einzelheiten verfolgt werden.

Die chemischen Untersuchungen des Grundwassers konnten im wesentlichen zwei Typen unterscheiden: Im südlichen Talbereich Wässer, die den Kalkschotterwässern sehr ähnlich sind, im nördlichen Talabschnitt bei Eschenlohe sulfatreiche Wässer, die von gipshaltigen Raibler-Schichten, die im Untergrund des Tales anstehen, beeinflußt sind.

Temperaturmessungen und chemische Untersuchungen ließen die Herkunft der Wässer der sulfatreichen Mühlbachquellen, der Lauterbachquelle und der chloridhaltigen „Sulfatquelle" bei Eschenlohe deuten.

Bei Messungen mit einem elektrischen Temperaturmeßgerät an Grundwassermeßstellen konnten Versickerungen aus der Loisach und aus dem Kuhfluchtgraben ins Grundwasser nachgewiesen werden. Es war möglich, Einspeisungen aus der Felsumrandung des Tales oder aus einem tieferen Grundwasserstockwerk zu erkennen.

Für die Abflußbilanz wurde der unterirdische Abfluß im Loisachtal zwischen Garmisch-Partenkirchen und Eschenlohe nach verschiedenen Methoden ermittelt, so wurden z. B. Berechnungen nach dem Gesetz von DARCY, mit der Wasserhaushaltsgleichung und mit Reihenabflußmessungen durchgeführt. Je nach der Rechenart traten im Ergebnis Differenzen bis zu 400 % auf. Diese Streuung liegt hauptsächlich an der unterschiedlichen Veranschlagung der k-Werte. Das zeigt, wie wichtig gerade in einer Bilanzaufstellung die exakte Ermittlung des k-Wertes ist. Es erwies sich auch, daß in einem so stark gegliederten Gebiet, wie es das Einzugsgebiet der Loisach für den Pegel Eschenlohe ist, über die Wasserhaushaltsgleichung nur grobe Näherungswerte zu erhalten sind. Verständliche Ergebnisse für den unterirdischen Abfluß konnten bei Benutzung von Reihenabflußmessungen erzielt werden. So wurden z. B. für den unterirdischen MW-Abfluß im Loisachtal bei Farchant 6,0–8,0 m^3/s, im Bereich der Brunnen 1–6 4,0–7,0 m^3/s und bei Eschenlohe 2,0–3,0 m^3/s gefunden. Durch Abflußspendenvergleiche des Loisachgebietes mit anderen Einzugsgebieten konnten diese Ergebnisse in ihrem Wert bestätigt werden.

Anhang

In dieser Arbeit verwendete Abkürzungen und Bezeichnungen:

Br.	=	Brunnen
F	=	Querschnittsfläche des Grundwasserleiters
Gesh.	=	Gesamthärte
HW	=	Hochwasserstand
I	=	Gefälle
k-Wert	=	Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens
Karbh.	=	Karbonathärte
Leitf.	=	elektrische Leitfähigkeit des Wassers
MQ	=	Mittelwasser (-abfluß)
MW	=	Mittelwasserstand
NW	=	Niedrigwasserstand
Q	=	Abfluß
Trock.R.	=	Trockenrückstand, bei chemischen Analysen
v_f	=	Filtergeschwindigkeit

Bezeichnungen der Grundwassermeßstellen:

E/1, D/1k, 2/b, 3/3, usw.	=	Aufschlußbohrungen, die zu Grundwassermeßstellen im zweiten Grundwasserstockwerk ausgebaut wurden, z. T. Schreibpegel.
1/P1, 2/P3, 3/P3 usw.	=	Speziell zur Beobachtung von Pumpversuchen angelegte Grundwassermeßstellen im zweiten Grundwasserstockwerk.
B/3R, 10/3R, 1/RP3 usw.	=	Rammpegel zur Beobachtung der Grundwasserstände im ersten Grundwasserstockwerk, z. T. Schreibpegel.

Literaturverzeichnis

AIGNER, D.: Das Murnauer Diluvium. – Mitt. Geogr. Ges. München, **8** S. 77–177, München 1913.

AMPFERER, O.: Geologische Beschreibung des Seefelder-, Mieminger- und südlichen Wettersteingebirges. – Jb. Geol. Reichsanst., **55** S. 451–563, Wien 1905.

BAUMGARTNER, A.: Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung, des vertikalen Wasserdampfaustausches und der Energiebilanz. – Dtsch. Gew. Mitt., Sd. H. „Deutsche Gewässerkundliche Tagung Regensburg 1966", Koblenz 1967.

BAUER, F.: Erfahrungen beim Uraninnachweis mit Aktivkohle. Steir. Beitr. Hydrogeol., Jg. 1966/67, H. 18/19, S. 169–178, Graz 1967.

BOLLMANN, H.: Berechnungsmethode der Grundwasserspende mit praktischen Beispielen.– Wasserwirtschaft, Jg. **11**, H. 8, S. 381–392, Berlin 1961.

CRAMER, H.: Grundwasser und Quellen des Bayerischen Alpengebietes. – Geol. Bav. **17** S. 150–163, München 1953.

CRAMER, K.: „Höhlen- und Karsterscheinungen" in: Erl. Geol. Karte von Bayern 1 : 25 000, Bl. Nr. 8342 Oberammergau, Bayer. Geol. L.-A., S. 99–105, München 1967.

DACHLER, R.: Grundwasserströmung. – 138 S., Wien (Springer) 1936.

DIELER, H., DIESEL, E., GROSSTEINBECK, J.: Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Grund- und Flußwasser im Rheintal bei Köln. – Geol. Mitt., Jg. **3**, H. 4, S. 313–338, Aachen 1964.

DROST, W., MOSER, H., NEUMAIER, F., RAUERT, W.: Über Anwendungen radioaktiver Isotope in der Hydrologie. – Gas u. Wasserfach, Jg. **106**, H. 4, S. 85–92, München 1965.

DÜRBAUM, H.: Über das Darcy'sche Gesetz und seine Anwendungsmöglichkeiten in der Hydrologie. – Dtsch. Gew. Mitt., Jg. **1**, H. 4/5, S. 76–82, Koblenz 1957.

ENGELHARDT, W. v.: Der Porenraum der Sedimente. – Min. u. Petrogr. in Einzeldarst, 2, 207 S., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960.

FELS, E.: Der Plansee. – Mitt. Geogr. Ges. München, **8**, S. 381–463, München 1913.

GERB, L.: „Reduzierte Wässer", Beitrag zur Typologie bayerischer Grundwässer. – Gas u. Wasserfach, Jg. **94**, H. 4, S. 87–92, und H. 6, S. 157–161, München 1953.

– Grundwassertypen. – „Vom Wasser", Ein Jahrbuch für Wasserchemie und Wasserreinigungstechnik, Bd. XXV, S. 16–47, Weinheim/Bergstr. (Verlag Chemie) 1958.

GRAHMANN, R.: Die Grundwässer der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. – Forsch. z. dtsch. Landeskd., **104**, Teil II, 198 S., Remagen (Bundesanst. f. Landeskunde) 1958.

GRUNOW, J.: Niederschlagsmessungen am Hang. – Met. Rdsch., Jg. **6**, H. 5/6, S. 85–91, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953.

HABER, G.: Vorläufige Mitteilungen über Ergebnisse einer Neuaufnahme des Kramer-Noth-Frieder-Gebietes (Farchanter Alpen). – Zentr. Bl. Min. usw., Jg. **1927**, Abt. B, S. 233–235, Stuttgart 1927.

HEIMBACH, H.: Geologische Neuaufnahme der Farchanter Alpen. – Gedr. Diss. Univ. München, 30 S., München 1895.

KÄSS, W.: Erfahrungen bei Färbversuchen mit Uranin. Steir. Beitr. Hydrogeol., Jg. **1964**, H. 17, S. 21–65, Graz 1965.

– Erfahrungen mit Uranin bei Färbversuche . – Steir. Beitr. Hydrogeol., Jg. **1966/67**, H. 18/19, S. 123–134, Graz 1967.

KELLER, R.: „Klima und Hydrologie", in Erl. z. Hydrogeol. Übersichtskarte d. Bundesrepublik Deutschland 1 : 500 000, Bl. München, S. 105–113, Remagen (Bundesanstalt für Landeskunde) 1956.

KERN, H.: Niederschlags-, Verdunstungs- und Abflußkarten von Bayern (Jahresmittel 1901/1951). – Veröff. a. d. Arbeitsgebiet d. Bayer. Landesst. f. Gewässerkd., München, 12 S., 4 Karten 1 : 100 000, München 1954.

– Karte der Linien gleicher mittlerer Abflußspenden (1901/1951) 1 : 200 000 (a. d. Arbeitsgebiet d. Bayer. Landesst. f. Gewässerkd., München).

KLEBELSBERG, R. v.: Glazialgeologische Notizen vom bayerischen Alpenrande I/II. – Zeitschr. f. Gletscherkd., Jg. **7**, S. 225–259, Berlin 1913.

– Glazialgeologische Notizen vom bayerischen Alpenrande III. – Ztschr. f. Gletscherkd., Jg. **7**, S. 226–262, Berlin 1914.

KNAUER, J.: Diluviale Talverschüttung und Epigenese im südlichen Bayern. – Geol. Bav., **11**, 32 S., München 1952.

KOCKEL, C. W., RICHTER, M., STEINMANN, H. G.: Geologie der bayerischen Berge zwischen Lech und Loisach. – Wiss. Veröff. D. u. Oe. AV. **10**, 231 S., 1 geol. Karte, Innsbruck 1931.

KOEHNE, W.: Grundwasserkunde. – 291 S., Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlg.) 1928.

KRAUS, E.: Über die jüngsten Bewegungstendenzen der Alpen. – Geol. Rdsch., **43**, H. 1, S. 109–138, Stuttgart 1955.

LEUCHS, K.: Der Bau der Südrandstörung des Wettersteingebirges. – Geol. Rdsch. **21**, S. 81–96, Stuttg. 1930.

LEVY, F.: Diluviale Talgeschichte des Werdenfelser Landes und seiner Nachbargebiete. – Ostalpine Formenstudien Abt. I/1, 191 S., (Bornträger) Berlin 1920.

LINKE, G.: Neue Ergebnisse zur Stratigraphie und Tektonik der Lahnenwiesmulde und ihrer näheren Umgebung. – Diss. Fr. Univ. Berlin, 114 S., Berlin 1963.

LOHR, A.: Beitrag zur Interpretation des Pumpversuches als instationärer Vorgang. – Gas u. Wasserfach, Jg. **108**, H. 12, S. 415–421, Berlin 1965.

MALASCHOFSKY, A.: Morphologische Untersuchungen im alpinen Isar-Loisachgebiet. – Mitt. Geogr. Ges. München, **33/34**, S. 43–136, München 1940/41.

MOSER, H.: Die Direktmessung hydrologischer Farbtracer im Gelände. – Steir. Beitr. Hydrogeol., Jg. **1966/67**, H. 18/19, S. 179–183, Graz 1967.

MUTSCHMANN, J., STIMMELMAYR, F.: Taschenbuch der Wasserversorgung. – 874 S., Stuttgart (Franckh) 1965.

NIEDEKMAYER, J.: Geologie der Bayerischen Alpen zwischen Loisach, Isar und Walchensee. – N. Jb. Min. etc., **76**. Beil.-Bd., Abt. B., S. 451–511, Stuttgart 1936.

– Geologische Karte der Bayerischen Alpen zwischen Loisach, Isar und Walchensee 1 : 250 000 mit Profiltafel 1 : 50 000. – N. Jb. Min. etc., **76**, Beil.-Bd., Abt. B., Stuttgart 1936.

PENCK, A., BRÜCKNER, E.: Die Alpen im Eiszeitalter. Bd. I: Die Eiszeiten in den nördlichen Ostalpen. 393 S., Leipzig (Tauchnitz) 1909.

REICH, H.: Feststellungen über diluviale Bewegungen am Nordrand der Bayerischen Alpen auf Grund seismischer Untersuchungen. – Geol. Rdsch. **43**, H. 1, S. 158–168, Stuttgart 1955.

REICHEL, E.: Die klimatischen Verhältnisse des Isar-Loisach-Würmgebietes. – Klimagutachten des Wetteramtes München, München 1954.

REUTER, L.: Der Boden Südbayerns mit seinen Quellen und Grundwasservorräten. – Festschr.: „60 Jahre Bayerisches Landesamt für Wasserversorgung 1878–1938", S. 33–72, München 1938.

RICHTER, M., STEINMANN, H. G.: Zur Tektonik der Bayerischen Alpen zwischen Ammer und Loisach. – Zentr. Bl. Min. usw., Abt. B, Jg. **1927**, S. 160–171, Stuttgart 1927.

SAUER, E.: Verbreitung, Zusammensetzung und Entstehung der diluvialen Seeabsätze im oberen Isartal. – Tschermaks Min. u. Petrogr. Mitt. **50**, S. 305–355, Wien 1938.

SCHIRMER, H.: Umstrittene Niederschlagsmessungen im Hochgebirge. – Mitt. Dtsch. Wetterdienst i. d. US-Zone, Nr. **11**, 14 S., Bad Kissingen 1951.

SCHMIDT-THOME, P.: Geologie des Isartalgebietes im Bereich des Rißbachstollens und des geplanten Sylvenstein-Staubeckens. – Geol. Bav. **4**, 55 S., München 1950.

– Klufttektonik und Großstrukturen in den nördlichen Kalkalpen. – Geol. Rdsch., **42**, S. 172–187, Stuttgart 1954.

– Zur Frage quartärer Krustenbewegungen im Alpen- und Voralpengebiet des Isartalbereiches. – Geol. Rdsch., **43**, H. 1, S. 144–158, Stuttgart 1955.

SCHNITZER, W. A.: Die Anwendung von Alkylbenzolsulfonaten zur Markierung unterirdischer Wasserwege. – Mémoires VII, Kongr. d. Int. Ass. d. Hydrogeologen 1965, Hannover, S. 217–219 Hannover 1967.

SCHUTZ, W.: Zur Frage der Wechselbeziehungen zwischen Fluß- und Grundwasserständen am Niederrhein. – Wasserwirtschaft, Jg. **42**, S. 432, Stuttgart 1951.

SPINDLER, A. de: Neue Fortschritte im Bereich der Wasserabflußmessungen im Salzverdünnungsverfahren. – Wasser- u. Energiewirtsch., **56**, H. 6, S. 165–168, Wien 1964.

STEINHÄUSSER, H.: Abfluß und Verdunstung in den österreichischen Südalpen. – Österr. Wasserwirtschaft, Jg. **4**, S. 222–225, Wien 1952.

– Der Wasservorrat aus der Wasserbilanz österreichischer Flußgebiete. – Österr. Wasserwirtschaft Jg. **20**, H. 1/2, S. 7–14, Wien 1968.

THIEM, G.: Berechnete und beobachtete Wassermengen. – Gas u. Wasserfach, Jg. **83**, H. 41, S. 509–513, München 1940.

THURNER, A.: Hydrogeologie. – 350 S., Wien/New York (Springer) 1967.
TOLLNER, H.: Zur Methode von Niederschlagsmessungen in Ostalpinen Quertälern mittlerer Höhenlage. – Österr. Wasserwirtschaft, Jg. **19**, S. 9–13, Wien 1967.
TRAUB, F.: Erläuterungen zur Hydrogeologischen Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 500000, Bl. Augsburg, 154 S., Remagen (Bundesanstalt für Landeskunde) 1955.
– Erläuterungen zur Hydrogeologischen Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 500000, Bl. München, 121 S., Remagen (Bundesanst. f. Landeskunde) 1956.
TROLL, C.: Die Eiszeitenfolge im nördlichen Alpenvorland. – Mitt. Geogr. Ges. München, **24**, H. 1, S. 215–226, München 1931.
– Die sogenannte Vorrückungsphase der Würmeiszeit und der Eiszerfall bei ihrem Rückgang. – Mitt. Geogr. Ges. München, **29**, S. 1–38, München 1936.
VIDAL, H.: Neue Ergebnisse zur Stratigraphie und Tektonik des nordwestlichen Wettersteingebirges und seines nördlichen Vorlandes. – Geol. Bav. **17**, S. 56–88, München 1953.
WIEDERHOLD, W.: Theorie und Praxis des hydrologischen Pumpversuches. – Gas u. Wasserfach, Jg. **106**, H. 34, S. 933–938, u. H. 42, S. 1170–1176, München 1965.
WOHLRAB, B., BOHN, O.: Wechselbeziehungen zwischen Fluß- und Grundwasserständen am Niederrhein. – Wasserwirtschaft, Jg. **47**, S. 53–59, Stuttgart 1956.
WUNDT, W.: Beziehungen zwischen den Mittelwerten von Niederschlag, Abfluß, Verdunstung und Lufttemperatur für die Landflächen der Erde. – Wasserwirtschaft, Jg. **32**, H. 5/6, Stuttgart 1937.
ZOGOVIC, D.: Petrogenetic Properties of Dolomites as a Factor of their Different Hydrogeologic Role in Dinaric Karst. – Mémoires VII, Kongr. d. Int. Assoz. d. Hydrogeologen **1965**, Hannover, S. 267–270, Hannover 1967.
ZWITTNIG, L.: Die Beeinflussung des Grundwassers durch Mülldeponien. – Steir. Beitr. Hydrogeol. Jg. **1963/64**, H. 15/16, S. 91–106, Graz 1964.

Außerdem standen folgende Unterlagen zur Verfügung:

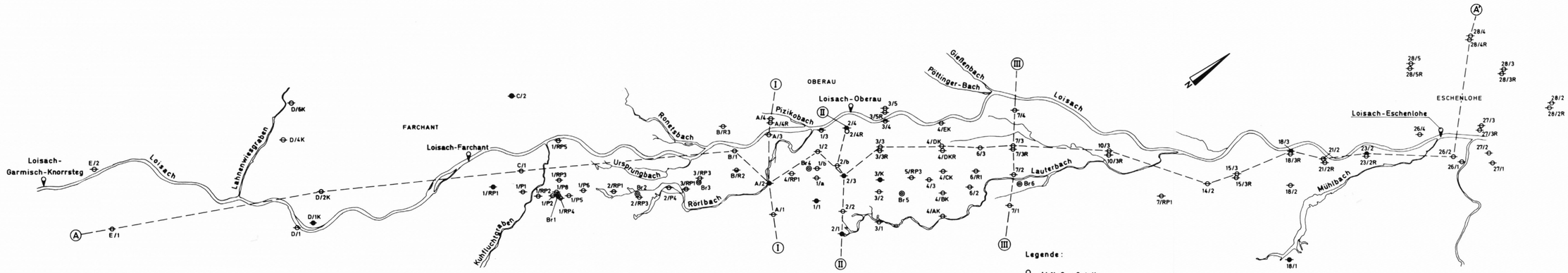
Amt für Bodenforschung, Hannover:
Gutachten über die geologisch/hydrologischen Verhältnisse im Loisachtal zwischen Eschenlohe und Oberau (Bericht über die dort ausgeführten geoelektrischen Messungen), ausgeführt für die Stadtwerke München, Wasserwerke. Hannover 1953.

Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München:
Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Donaugebiet, Abflußjahr 1963, 130 S., München 1966.

Deutscher Normenausschuß (DNA):
DIN 4022, Bl. 1, Schichtenverzeichnis und Benennen der Boden- und Gesteinsarten, Baugrunduntersuchungen, 1955.
DIN 4022, Bl. 2, Schichtenverzeichnis und Benennen der Boden- und Gesteinsarten, Wasserbohrungen, 1955.
DIN 4023, Baugrund- und Wasserbohrungen, zeichnerische Darstellung der Ergebnisse, 1955.
DIN 4046, Wasserversorgung, Fachausdrücke und Begriffserklärungen, 1960.
DIN 4049, Bl. 1, Gewässerkunde, Fachausdrücke und Begriffsbestimmungen, Teil I: quantitativ, 1954.

Stadtwerke der Landeshauptstadt München, Wasserwerke:
Vorläufiger Entwurf Wassergewinnung im Raume Oberau–Eschenlohe, München 1959.
Nachtrag zum vorläufigen Entwurf: Wassergewinnung im Raume Farchant–Oberau–Eschenlohe, Mappe I, München 1961.
Wassergewinnung im Raume Farchant–Oberau–Eschenlohe, Bohrprofile und Wasserstandsmessungen, Mappe II, München 1961.
Bericht der Stadtwerke München, Abt. Wassergewinnung, über die Aufschlußbohrungen im Profil D im Loisachgebiet südlich Farchant, München 1962.
Bericht über den Pumpversuch der Versuchsbrunnenanlage 5 im Loisachgebiet vom 16.2.1965 bis 30.4.1965, München 1965.
Bericht über den Großpumpversuch mit den Versuchsbrunnen 1, 2, 3, 4, 5 und 6 im Loisachgebiet vom 10.1.1966 bis 16 bis 16.5.1966, München 1966.

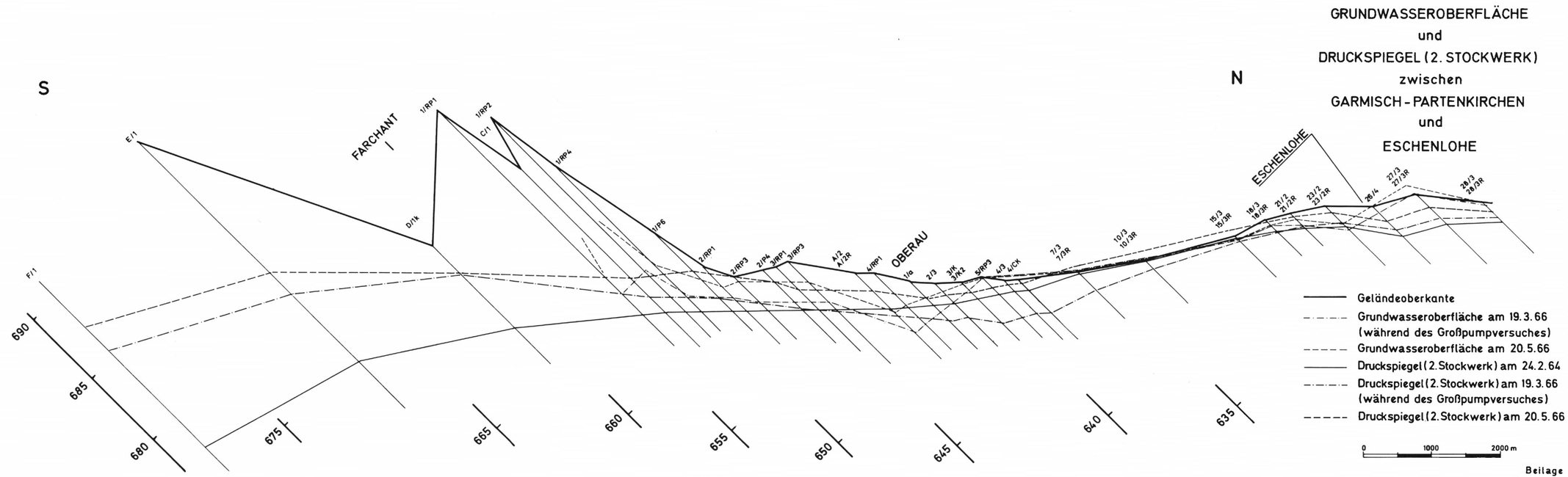
REICH, H., Institut für angewandte Geophysik, Universität München:
Seismische Untersuchungen im Loisachmoos zwischen Eschenlohe und Oberau, München 1952.
Seismische Untersuchungen im Loisachtal zwischen Oberau und Garmisch. (22. Febr., 26. April bis 7. Mai 1954), München 1954.
Bericht über seismische Untersuchungen bei Eschenlohe am 2. April 1955, München 1955.



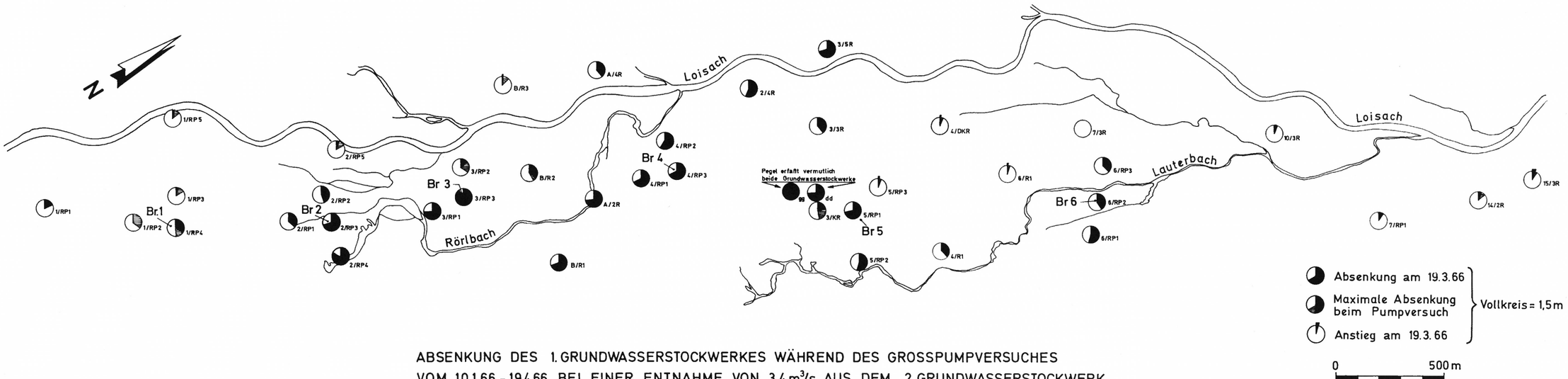
LAGEPLAN DER GRUNDWASSER – U. ABFLUSSMESSTELLEN UND DER SCHNITTFÜHRUNG DER GEOLOGISCHEN PROFILE IM LOISACHTAL ZWISCHEN GARMISCH-PARTENKIRCHEN UND ESCHENLOHE.

Beilage 1

GRUNDWASSEROBERFLÄCHE und DRUCKSPIEGEL (2. STOCKWERK) zwischen GARMISCH - PARTENKIRCHEN und ESCHENLOHE



Beilage 2



ABSENKUNG DES 1. GRUNDWASSERSTOCKWERKES WÄHREND DES GROSSPUMPVERSUCHES
VOM 10.1.66 - 19.4.66, BEI EINER ENTNAHME VON 3,4 m^3/s AUS DEM 2. GRUNDWASSERSTOCKWERK

Beilage 3