Biblioteka Politechniki Krakowskiej
100000300005

X
2404

Hydrologische Methoden.

Dissertation

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs durch die Königliche Technische Hochschule zu Stuttgart

verfaßt

von

G. Thiem,

Zivilingenieur in Leipzig.

F. Nr. 27893

Königl. Ministerium der öffentlichen Arbeiten Bibliothek

Leipzig,

J. M. Gebhardt's Verlag.

1906.

2.404

Die vorliegende Abhandlung haben wir nach der Richtung hin geprüft, ob sie die Befähigung des Verfassers zum selbständigen wissenschaftlichen Arbeiten auf technischem Gebiet dartut (§ 1, Ziffer 3 der Promotionsordnung). Die eingehende Beurteilung ist beim Rektorat der technischen Hochschule niedergelegt.

Referent Professor **Dr. Lueger**,
Korreferent Professor **Laißle**
und stellv. Autenrieth.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW
II 31167

Akc. Nr. 2185/49

Meinem Vater

A. Thiem.

In vorliegender Arbeit gründen sich die Ergebnisse mit den sich daran anschließenden Folgerungen und Schlüssen auf eine hydrologische Untersuchung, die zwecks einer Grundwasserversorgung der Stadt Prag und ihrer Vorstädte in den Talniederungen der Elbe und der Iser bei Alt-Bunzlau vorgenommen wurde. Die auf dem Untersuchungsgebiet angewandte Methode weicht von den allgemein gebräuchlichen erheblich ab und es galt, sie auf ihre praktische Brauchbarkeit zu prüfen und ihren Wert zu erkennen für die Beurteilung der hydrologischen Vorgänge im Untergrunde. Naturgemäß kann sich auf dem Gebiete der Hydraulik jede Erkenntnis nur allmählich vollziehen, denn das Verfolgen von Bewegungserscheinungen jeglicher Art, die Ermittlung der sie bedingenden Ursachen und davon abhängig der Größe und Art der Wirkung gestaltet sich meist schwierig und zeitraubend. In der Regel wird nicht ein Versuch, sondern nur eine lange Reihe von solchen in verschiedenen Anordnungen und Abänderungen den Untersuchenden in den Stand setzen, zu einem richtigen und zuverlässigen Ergebnis zu gelangen. Aus diesem Grunde behandelt diese Schrift von dem umfangreichen Material, das während einer halbjährigen Untersuchungsdauer gewonnen wurde, nur die Beobachtungen und Ergebnisse des letzten Arbeitsabschnittes, als es nach manchem Mißerfolg gelungen war, einen großen Teil der Schwierigkeiten zu beseitigen und die Versuchsanordnung so zu treffen, wie es zur Erzielung eines praktisch brauchbaren und einwandfreien Resultates nötig ist.

Inhaltsverzeichnis.

Text:

Seite

I. Die bekannten hydrologischen Methoden 1
II. Eine neue Methode 6
a) Die rechnerische Ableitung 6
b) Die praktische Anwendung auf das Isertal bei Alt-Bunzlau 13
α) Das Untersuchungsgebiet 13
β) Die Versuchsanordnung 15
γ) Fehlerquellen 20
III. Die Berechnung der Grundwassermengen 22
IV. Wechselbeziehungen zwischen dem Fluß und dem Grundwasser . . 27

Beilagen:

1. Schichtenfolgen der Bohrungen mit hydrologischen und anderen Angaben . 47—52
2. Ergebnisse der Messungen und Rechnungen . . . . . 53—56

Zeichnungen:

Blatt 1. Übersichtsplan.
„ 2. Geologisches und hydraulisches Profil.
„ 3. Lageplan der Bohrungen und Profilzüge.
„ 4. Diagramm der Ergiebigkeiten.
„ 5. Spiegelgänge der Iser mit Angabe der Untersuchungszeit der Bohrungsgruppen.
„ 6. Gänge der Spiegel und des Grundwassergefälles.
„ 7 und 8. Messungsergebnisse der Bohrungsgruppen 1—2 und 15—16.

I. Die bekannten hydrologischen Methoden.

Mögen die Methoden, derer sich der Hydrologe bei seinen Untersuchungen bedient, auch noch so verschiedenartig sein: das endliche letzte Ergebnis, das er aus seinen Betrachtungen und Berechnungen gewinnt, ist immer in der Form einer dürren Zahl ausgedrückt, deren Größe Aufschluß gibt über die zeitliche Menge, die ein Grundwasserstrom von gegebener Ausdehnung zu liefern vermag. Je mehr der Untersuchende bei seinen Studien sich auf logisch festgestellte Tatsachen stützt, je weniger er also Mutmaßungen ein Recht einräumt, ein um so größeres Gewicht ist seinen Behauptungen beizulegen, und um so leichter wird es für ihn sein, den Kritiker von der Richtigkeit seiner Anschauungen zu überzeugen.

Das Grundgesetz, nach dem sich alle hydraulischen Erscheinungen im durchlässigen, sandigen Untergrund vollziehen, ist von dem verdienstvollen französischen Hydrauliker Darcy aufgestellt worden. Durch wiederholte Versuche und durch die Erfahrung ist die Richtigkeit und Zuverlässigkeit des Gesetzes geprüft und bestätigt worden, so daß sich der Ingenieur seiner mit der größten Sicherheit bedienen kann.

Der von Darcy gefundene Satz besagt, daß sich die Bewegung des Wassers in den durchlässigen Schichten des Untergrundes wie in einem künstlichen Filter vollziehe und er lautet in erweiterter Form

$$Q = k\,i\,F \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Hierin bedeutet:

F das vom Wasser senkrecht zur jeweiligen Strömungsrichtung durchflossene Durchgangsprofil;
i das in ihm herrschende natürliche spezifische Gefälle;
k einen von der Durchlässigkeit des Filtermaterials abhängigen Koeffizienten;
Q die das Profil in der Zeiteinheit durchströmende Wassermenge.

Die Gefällsbestimmung erfolgt bei einer Untersuchung meist zuerst, da sie sich am leichtesten vornehmen läßt und man zu ihrer Ermittlung keine weiteren Maßnahmen zu treffen hat. Vielfach gibt ein Nivellement der ungestörten Spiegel vorhandener Dorf-, Haus- und Bahnwärterbrunnen, oder, falls deren Anzahl ungenügend sein sollte, einiger durch Schürfung oder Bohrung neu aufzudeckender Spiegel schon den ersten Aufschluß über Größe, Sinn und Richtung des Gefälles i. Die Bestimmung des Durchgangsprofils F erfolgt durch Bohrungen, aus deren Schichtenfolgen die Mächtigkeit des wasserführenden Mittels sich sofort ergibt. So einfach der

Bohrvorgang im allgemeinen auch ist, so erfordert er doch immerhin Aufmerksamkeit und dauernde Beobachtung, um Zustandsänderungen in den Lagen erbohrter Spiegel, die manchmal durch kleine, unscheinbare Einlagerungen hervorgerufen werden, in ihren Ursachen zu erkennen und zu verfolgen; nur so kann man es erreichen, daß bei der späteren Bearbeitung und Auftragung des gewonnenen Materials Unerklärlichkeiten in den Spiegellagen aufgedeckt und die größten Irrtümer in den Schlußfolgerungen beseitigt werden.

Während sich nun der sicheren Feststellung von Gefälle und Mächtigkeit keine Schwierigkeiten in den Weg stellen, gilt dies für die Bestimmung von k keineswegs, und man ist gezwungen, auf Umwegen diesen Wert zu ermitteln. Der tatsächliche Zwischenraum des Filtermaterials ist für die Durchlässigkeit weniger ausschlaggebend, denn grob- und feinkörniges Material können je dasselbe Porenvolumen besitzen, während die Durchlässigkeit des ersteren die des letzteren bei weitem überwiegt. Bei gleichbleibendem Porenvolumen tritt mit dem Wachstum des dem Korn jeweils eigentümlichen Hohlraumes eine Verminderung der vom Wasser benetzten Kornoberfäche ein, wodurch eine Abnahme der Reibungsarbeit der einzelnen Wassermoleküle und damit eine Zunahme der Durchlässigkeit verbunden ist. Nur die Art, Anordnung, Beschaffenheit und Lagerung der einzelnen Kornelemente und die Verschiedenartigkeit der dadurch bedingten Ausbildung der Hohlräume beeinflussen k. Darum können auch alle Versuche, die darauf hinzielen, den Durchlässigkeitskoeffizienten mit Hilfe der gewonnenen Bohrproben zu ermitteln, nur einen theoretischen Wert haben und müssen deshalb für den Hydrologen als unbrauchbar bezeichnet werden. Niemals wird es möglich sein, die natürliche Lagerung im Untergrund auf künstlichem Wege zu wiederholen; immer wird der neue Zustand ein gelockerterer sein als der wirkliche.

Da in der Formel (1) F einen konstanten Querschnitt bezeichnet, so muß das Produkt aus Gefälle und Durchlässigkeit ki die Strömungsgeschwindigkeit v, senkrecht zum Durchgangsprofile, darstellen.

Es ist nun ein Verfahren ausgebildet worden, mit Hilfe dessen die Geschwindigkeit eines Grundwasserstromes direkt bestimmt werden kann, ohne daß der Untergrund in seinem natürlichen Aufbau irgendwie eine Veränderung erleidet.*) Die Anwendung des Verfahrens in seiner einfachsten Form ist kurz folgende: Bringt man bei zwei Bohrlöchern a und b, deren gegenseitige Entfernung das Maß von 10—50 m nicht überschreitet und deren Verbindungslinie parallel zur Strömungsrichtung sich befindet, in das Bohrloch mit dem höher liegenden Spiegel a eine konzentrierte Kochsalzlösung ein, so würde unter der Annahme eines durchaus ruhigen Wasserspiegels sich das Kochsalz auf dem Wege der Diffusion, radial vom Aufgabeort a aus, im Untergrund verteilen. Schließlich wird sich die gesamte Lösung auf dem ganzen Feld in gleichmäßiger Stärke verteilt haben; bis zur Er-

*) Siehe A. Thiem, Neue Messungsart natürlicher Grundwassergeschwindigkeiten, Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, Jahrgang 1888.

reichung dieses Endzustandes wird immer im Aufgabeort *a* der größte Gehalt an Kochsalz nachzuweisen sein. Erteilt man nun dem Grundwasser eine gleichmäßige Bewegung in der Richtung *a—b*, so wird das Maximum des Kochsalzgehaltes *a* verlassen und sich mit der natürlichen Grundwassergeschwindigkeit nach *b* verschieben. Es ist demnach nur nötig, die Zeitdauer zu messen, innerhalb welcher der Punkt der höchsten Kochsalzmischung von *a* nach *b* fortschreitet. Der Quotient aus der Wegelänge *ab* und der gefundenen Zeit gibt ohne weitere Kenntnis des Diffusionsvermögens des Salzes sofort die natürliche Grundwassergeschwindigkeit bezogen auf die Durchgangsöffnungen des Profiles. So einfach und einleuchtend auch dieses Verfahren erscheint, um so heikler und vorsichtiger muß man in der Anwendung desselben sein. Wechselnde Durchlässigkeiten des Untergrundes, Änderungen in der Richtung der Geschiebeablagerung, wasserstockwerkartige Einlagerungen, Verschiedenheit in den Geschwindigkeiten der einzelnen Wasserfäden beeinflussen störend das Beobachtungsbild, und die Ausbildung einer einzigen, streng zu unterscheidenden Kulmination des Kochsalzgehaltes in den unterhalb vom Aufgabeort liegenden Bohrlöchern tritt nicht in die Erscheinung.

Dieselben Bedenken und Einwendungen können erhoben werden gegen eine von Slichter angewandte elektrische Methode, die in den Water Supply and Irrigation Papers of the United States, N. A., Geological Survey Nr. 67 in ihren Grundzügen veröffentlicht ist. Das Verfahren, dessen er sich zur unmittelbaren Messung der natürlichen Geschwindigkeit des Grundwassers bedient, besteht darin, daß in der Stromrichtung zwei Nortonbrunnen in einer geringen gegenseitigen Entfernung von ungefähr 1 bis 2 m niedergebracht werden. Der untere, stromabwärts gelegene Brunnen wird in eine Art galvanisches Element verwandelt, dadurch, daß ein in ihm versenkter gegen die Brunnenwandung durch Gummi geschützter Messingstab als die eine Elektrode dient, der eiserne Brunnenmantel als die andere.

Im allgemeinen wird sich zwischen beiden die Ausbildung eines starken elektrischen Stromes infolge der mangelnden Leitungsfähigkeit des reinen Wassers nicht wahrnehmen lassen. Beschickt man jedoch den oberen Brunnen mit einer Lösungsflüssigkeit, z. B. Salzsäure, so wird diese auf ihrem Wege gemäß der herrschenden Strömungsgeschwindigkeit den unteren Brunnen erreichen, dem Wasser die fehlenden zersetzenden Eigenschaften verleihen und sofort einen Ausschlag der Nadel an dem im Stromkreis eingeschalteten Ampèremeter hervorbringen. Erreicht dieser sein Maximum, so hat der Punkt des höchsten Säuregehaltes den tiefer gelegenen Brunnen durchströmt und die Ermittlung der natürlichen Grundwassergeschwindigkeit kann auf ähnliche Weise wie beim Kochsalzverfahren geschehen.

Slichter hat dieses Verfahren in einer etwas mehr ausgebildeten Weise bei einer Untersuchung der Grundwasserströme auf Long Island für die Erweiterung der Wasserversorgung von Brooklyn angewandt und der Verfasser dieser Arbeit hatte hierbei Gelegenheit, die Versuchseinrichtung

kennen zu lernen. Über die Art und Verwertung der Beobachtungen und ihre Zusammenfassung zu einem Endergebnis ist es jedoch nicht möglich gewesen, einen Aufschluß zu erhalten.

Zuweilen besteht eine weitere Möglichkeit, die Geschwindigkeit eines Grundwasserstromes, allerdings nur bei freiem Spiegel und nicht zu unregelmäßigem Spiegelrelief, auf rein natürlichem Wege zu messen bei Eintritt einer Hochwasserwelle, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit, wie leicht zu beweisen, nahezu gleich derjenigen des Stromes ist. Man mißt an mehreren Beobachtungsorten, die möglichst im Stromgefälle liegen müssen und deren gegenseitige Entfernung bekannt ist, die Zeit, in der der Wasserstand an jedem einzelnen Ort, beeinflußt durch den Vorübergang der Hochwasserwelle, seine größte Höhe erreicht.

Die Kenntnis des Abstandes der Beobachtungspunkte im Verein mit der Zeit gibt das Maß der Geschwindigkeit. Wie schon betont, ist die Anwendung dieser Methode nur auf freie Spiegel anwendbar; bewegt sich das Wasser, wie in einem Rohr unter Spannung, dann ist die Ausbildung einer wirklichen Hochwasserwelle wegen Raummangels im Untergrund unmöglich. An Stelle der langsamen mechanischen Fortpflanzung tritt diejenige des Druckes, die ihre Wirkungen rasch und unvermittelt zum Ausdruck bringt. Zu der beschränkten Anwendung dieses Verfahrens tritt noch als ein wesentlicher Nachteil hinzu, daß bei den allgemein sehr geringen Geschwindigkeiten der Nachweis der Gleichartigkeit der an verschiedenen Orten beobachteten Anschwellungen nicht immer zu erbringen und man leicht durch Verwechslung Messungsfehlern ausgesetzt ist.

Ein weiteres wertvolles Hilfsmittel, das allerdings k nicht in absolutem Maß erscheinen läßt und darum nur in der Hand eines praktisch geschulten Hydrologen von Wert sein kann, ist die Ermittlung der spezifischen Ergiebigkeit eines in einen Rohrbrunnen verwandelten Bohrloches. Darunter ist diejenige Ergiebigkeit zu verstehen, die ein Rohrbrunnen bei einem Meter Absenkung des natürlichen Spiegels zu liefern vermag; sie ist also dargestellt durch einen Quotienten, dessen Zähler die tatsächlich geförderte Menge enthält und dessen Nenner das Maß der Absenkung angibt. Diese Annahme ist jedoch nur vollkommen richtig für Brunnen, die artesisches Wasser liefern und auch nur, solange die Absenkung sich innerhalb der wasserundurchlässigen Deckschichten hält. Bei freien Spiegeln hingegen vollzieht sich der Ergiebigkeitsgang nach einem parabolischen Gesetz; jedoch kann bei großen Mächtigkeiten der wasserführenden Schichten und entsprechend geringen Absenkungen ohne erheblichen Fehler das Ergiebigkeitsgesetz als ein geradliniges angesehen werden. Jedenfalls ist dem praktischen Bedürfnis durchaus damit gedient. Mit Hilfe der auf diesem Wege gewonnenen Werte für die spezifischen Ergiebigkeiten ist es möglich, auf Grund früherer, auf anderen Feldern gesammelter Erfahrungen, deren hydrologischer Wert durch Tatsachen erwiesen ist, sich ein Urteil über ein neues Feld zu bilden und die fehlende Kenntnis der Durchlässigkeit durch eine vergleichende Erwägung zu ersetzen.

Die zuverlässigste und darum meist angewandte Methode für die Ermittlung der Durchlässigkeit ist die Bewirtschaftung eines Versuchsbrunnens; ein solcher sollte nur dann betrieben werden, wenn vorher durch eingehende Untersuchung die bedingte Brauchbarkeit eines Feldes nachgewiesen ist. Handelt es sich nur um die Beschaffung einer kleineren Wassermenge, die den Wert von 100 Sek.-Ltr. nicht übersteigt, dann wird man dem Bezugsort die geforderte Menge in sichtbarer Form entnehmen. Sind jedoch bedeutende Mengen im Betrage von 50000 bis 60000 cbm auf den Tag nachzuweisen, dann wäre es unwirtschaftlich und in vielen Fällen wegen mangelnder Vorflut fast unmöglich, den gesamten geforderten Bedarf zutage zu fördern und einwandfrei abzuleiten; man beschränkt sich vielmehr darauf, einen Teilbetrag des verlangten Wasserquantums durch den Versuchsbrunnen zu gewinnen, dessen Entnahmebreite man bei einer gewissen Beanspruchung aus der Größe der Absenkung und der gegenseitigen Lage der umgebenden Spiegel ermittelt, um schließlich zu folgendem, auf induktivem Wege hergeleiteten Schluß zu kommen: Liefert der Grundwasserstrom mit einer Gesamtbreite von l Metern auf den $l$ten Teil seiner Breite q Sek.-Ltr. dann wird das ganze Versuchsfeld unter sonst gleichen Umständen bei vollständiger Ausnutzung lq Sek.-Ltr. liefern. Dieser Schluß ist nur richtig, wenn allerorts dieselbe hydrologische und geologische Beschaffenheit, sowie die gleiche Durchlässigkeit des Untergrundes vorherrscht, ein Fall, der bei Grundwasserströmen von bedeutender Breitenentwicklung nur selten anzutreffen ist. Darum ist auch diese Methode des Versuchsbrunnens, von einem Einzelverhalten auf die Allgemeinheit zu schließen, mit großer Vorsicht anzuwenden, selbst dann, wenn die Untersuchung eine gut übereinstimmende Gleichartigkeit des Gesamtfeldes ergeben hat.

Alle bisher erläuterten Verfahren zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten k sind durchaus nicht erschöpfend dargestellt, sondern allgemein nur nachrichtlich erwähnt; namentlich ist nicht Bezug genommen auf Ergebnisse von Untersuchungen, die auf verschiedenen Feldern mit dieser oder jener Methode vorgenommen wurden und es wurde ferner nicht erwähnt, ob und inwieweit die sich an bekannte Untersuchungen anknüpfenden Folgerungen und Schlüsse berechtigt waren und durch spätere konstruktive Maßnahmen bestätigt wurden. Immerhin läßt sich aus dem Gesagten schließen: Die genannten Verfahren sind teils nur unter besonders günstigen Umständen anwendbar, wie die Salzungsversuche und die Ermittlung der Geschwindigkeit der Hochwasserwelle, anderenteils erfordern sie zu ihrer Durchführung einen bedeutenden Kostenaufwand, wie die Bewirtschaftung eines Versuchsbrunnens, oder man erhält schließlich, wie bei der Messung der spezifischen Ergiebigkeiten, nur ein relatives Maß für k.

II. Eine neue Methode.

a) Die rechnerische Ableitung.

Das Hauptgewicht der folgenden Abhandlung besteht darin, theoretisch-analytische Unterlagen für die Ermittlung von k zu geben und daraufhin den Beweis ihrer praktischen Verwertung auf einem nach dieser Methode untersuchten Feld zu führen.

Setzt man in der Formel

$$Q = k i F \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

an die Stelle von F den Wert ψf, worin ψ das Verhältnis zwischen durchlassender und benetzter Fläche angibt, und faßt man dann das Produkt $k\psi$ in einen Ausdruck ε zusammen, dann nimmt obige Formel diese Gestalt an

$$Q = \varepsilon i f \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

und hierin bezeichnet

ε die „Einheitsergiebigkeit", d. h. diejenige Wassermenge, die die Flächeneinheit eines Quadratmeters, bei herrschender spezifischer Gefällseinheit in der Zeiteinheit einer Sekunde liefern würde,

f die benetzte Profilfläche, senkrecht zur herrschenden Strömungsrichtung,

i wie früher, das natürliche, spezifische Gefälle.

Mit der Wahl der Bezeichnung „Einheitsergiebigkeit" für ε ist zugleich die Dimensionalität dieses Ausdruckes festgelegt und die Größen f und i in der Gleichung (2) können demnach, da ε ein Kubikmaß bezeichnet, nur Verhältniszahlen sein, die angeben, wievielmal die wirksame Filterfläche und ebenso das verbrauchte Gefälle größer sind als die Einheit. Im gleichen Sinne äußert sich Forchheimer in seiner Schrift: „Über die Ergiebigkeit von Brunnenanlagen und Sickerschlitzen", die in der Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover, Jahrgang 1886 veröffentlicht wurde, zu dem Ausdruck k wörtlich auf Seite 16 wie folgt: „Es bezeichnet k die Wassermenge in Kubikmetern, welche durch 1 qm Filterfläche unter dem Druck einer 1 m hohen Wassersäule fließt, wenn man als Filterstoff die den Brunnen umgebende Bodenart wählte."

Unabhängig von ihm spricht sich Slichter in seinem Werke: „Theoretical investigation of the motion of groundwaters", veröffentlicht als Auszug im zweiten Teil des neunzehnten jährlichen Berichts des geologischen Instituts der Vereinigten Staaten, auf Seite 323 und 359 folgendermaßen aus: „The constant k is the quantity of water that would be transmitted in unit time through a cylinder of the soil of unit length and unit cross section under unit difference in head at the ends."

Das von Darcy über die Bewegung des Wassers im Untergrund aufgestellte Gesetz (von Dupuit in seinem Werke: „Traité de la conduite et de la distribution des eaux", auf Seite 29 angeführt) lautet:

$$Q = k \frac{H}{e}.$$

Gemäß den Worten der genannten Abhandlung bedeuten:

Q le produit par mètre carré d'une couche filtrante,

e son épaisseur,

H la charge ou la difference de niveau entre les orifices,

k un coefficient, variable seulement suivant la nature de la couche.

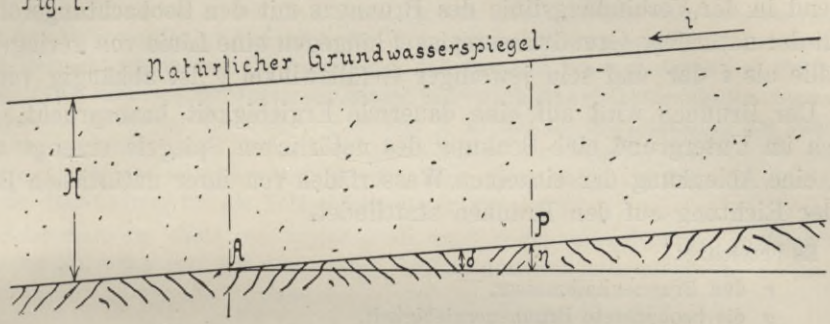
Hiernach sind e und H Längenmaße, ihr Quotient muß nullter Dimension sein und folglich ist k, da Q ein Raummaß bedeutet, dritter Dimension.

Für die Auswertung der Durchlässigkeit des Untergrundes wurde folgender Weg eingeschlagen:

In nachstehenden Zeichnungen ist in zwei Schnitten und im Grundriß (Fig. 1, 2 und 3) ein Grundwasserstrom dargestellt, dessen seitliche

Profil AP.

Fig. 1.

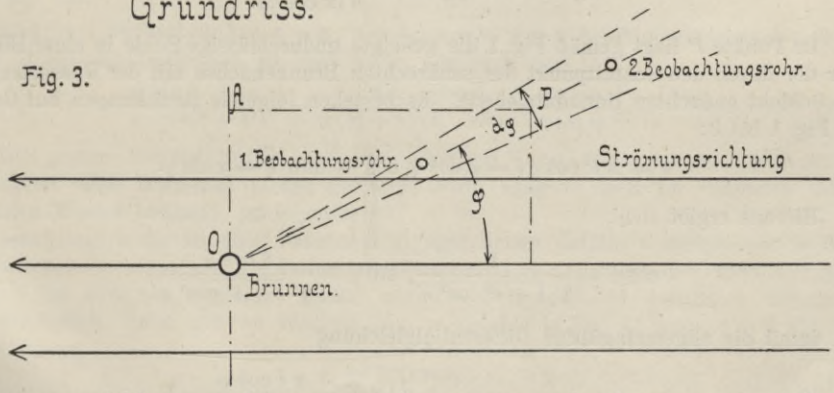


Profil OP.

Fig. 2.

Grundriss.

Fig. 3.



Breitenentwicklung unbegrenzt sein möge und dessen unbeeinflußte Strömungsrichtung unter der Voraussetzung gleichartiger Untergrundsbeschaffenheit durch parallel gelegte Pfeile angedeutet ist. In diesem

Strom befindet sich ein Brunnen nebst zwei Beobachtungsrohren, deren gerade Verbindungslinie mit der herrschenden Stromrichtung den Winkel φ einschließt. Der natürliche Stromspiegel stellt eine geneigte Ebene, parallel zur undurchlässigen Sohle dar; in einem Längsprofil parallel zur Strömungsrichtung würde er als Linie mit dem natürlichen spezifischen Gefälle i, siehe Profil AP, Fig. 1, erscheinen. In einem senkrechten Profil OP, Fig. 2, liegend in der Verbindungslinie des Brunnens mit den Beobachtungsrohren stellt der natürliche Grundwasserspiegel hingegen eine Linie von geringerem Gefälle als i dar und sein jeweiliger Gefällswinkel γ ist abhängig von φ.

Der Brunnen wird auf eine dauernde Ergiebigkeit beansprucht, wodurch im Untergrund eine Senkung des natürlichen Spiegels erzeugt wird und eine Ablenkung der einzelnen Wasserfäden von ihrer natürlichen Bahn in der Richtung auf den Brunnen stattfindet.

Es bezeichne:

r den Brunnenhalbmesser,
q die beobachtete Brunnenergiebigkeit,
H die Mächtigkeit der wasserführenden Schicht im ungestörten Zustande des Grundwasserspiegels,
x und y die jeweiligen Koordinaten eines Punktes der Senkungsfläche, bezogen auf den Schnitt der Sohlenfläche mit der Brunnenachse als Ordinatenanfang,
s und s_1 die Differenzen zwischen dem natürlichen und künstlichen Grundwasserspiegel,
h und h_1 die um s und s_1 verminderten Mächtigkeiten der wasserführenden Schicht,
a und a_1 die Entfernungen der Beobachtungsrohre von der Brunnenachse.

Zeichnet man weiterhin im Grundriß, Fig. 3, einen Sektor mit dem Zentriwinkel $d\varphi$ ein, dessen Spitze sich im Achsmittelpunkte des Brunnens befindet und dessen Schenkel mit der Strömungsrichtung den Winkel φ bilden, so wird im Abstande x vom Brunnen beim Punkte P die Wassermenge dq den Sektor durchfließen. Nach dem Darcyschen Gesetz gilt entsprechend Gleichung (2)

$$dq = \varepsilon\, x \cos\gamma\, y \,.\, d\varphi \,\frac{d\,(y + x \sin\gamma)}{d\,(x \cos\gamma)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Im Punkte P liegt gemäß Fig. 1 die geneigte undurchlässige Sohle in einer Höhe η über der durch den Schnittpunkt der senkrechten Brunnenachse mit der wassertragenden Schicht gedachten Horizontalebene. Es bestehen folgende Beziehungen auf Grund der Fig. 1 bis 3:

$$\eta = \overline{AP} \cos \delta i = x \cos\varphi \cos\gamma i \text{ und } \eta = x \sin\gamma.$$

Hieraus ergibt sich:

$$\cos\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + i^2 \cos^2\varphi}}, \quad \sin\gamma = \frac{i \cos\varphi}{\sqrt{1 + i^2 \cos^2\varphi}}$$

und damit die allgemeingültige Differentialgleichung

$$dq = \frac{\varepsilon\, x y \,.\, d\varphi}{\sqrt{1 + i^2 \cos^2\varphi}} \cdot \frac{d\left(y + \dfrac{x i \cos\varphi}{\sqrt{1 + i^2 \cos^2\varphi}}\right)}{d\,\dfrac{x}{\sqrt{1 + i^2 \cos^2\varphi}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Bei den in der Praxis vorkommenden Fällen ist in der Regel i eine sehr kleine Größe, weshalb man $i^2 \cos^2 \varphi$ gegenüber 1 vernachlässigen kann, ohne einen erheblichen Irrtum zu begehen. Geschieht dies, so folgt aus Gleichung (4):

$$dq = \varepsilon x y d\varphi \left(\frac{dy}{dx} + i \cos \varphi\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Indessen ist auch bei dieser vereinfachten Differentialgleichung die Integration nur dann möglich, wenn die gegenseitigen Beziehungen der Veränderlichen x, y und φ klargestellt sind. Zunächst ist nun x unabhängig von φ. Unterstellt man dasselbe für y, so ist das gleichwertig der Annahme, die in Luegers „Wasserversorgung der Städte", S. 453, gemacht wurde und die voraussetzt, daß das dem Brunnen durch das Flächenelement $xy d\varphi$ zuströmende Wasser der ganzen Höhe nach eine gleichförmige Geschwindigkeit besitzt. Je kleiner das Gefälle i ist und je größer die Mächtigkeiten der wasserführenden Schichten sind, um so mehr kommt diese Annahme der Wirklichkeit nahe. Forchheimer gibt in seiner Seite 6 erwähnten Abhandlung auf Seite 34 eine ausführliche Begründung für die Zulässigkeit dieser Annahme.

Setzt man die Werte von x und y als unabhängig von φ voraus, so folgt aus Gleichung (5), wenn man auf den ganzen Umfang des Brunnens integriert,

$$q = \varepsilon x y \frac{dy}{dx} \int_0^{2\pi} d\varphi + \varepsilon x y i \int_0^{2\pi} \cos \varphi \, d\varphi = 2 \pi \varepsilon x y \frac{dy}{dx} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Ist q, die beobachtete konstante Brunnenergiebigkeit, gegeben, dann liefert eine weitere Integration die bekannte Beziehung

$$y^2 = \frac{q}{\pi \varepsilon} ln x + C \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

In dieser Gleichung für die Senkungsfläche sind die Koordinaten x und y, wie es auch die Fig. 2 verdeutlicht, von der gegen den Horizont geneigten undurchlässigen Sohle aus gemessen. Würde die Neigung verschwinden, so würde Gleichung (7) in derselben Form erhalten bleiben und dann identisch sein mit der Gleichung, die für die Wasserentnahme aus Brunnen mit horizontaler undurchlässiger Sohle und demgemäß auch horizontalem Grundwasserspiegel besteht.

Es ist somit nicht schwierig, die Depressionsfläche für Brunnen mit geneigter undurchlässiger Sohle aus der mit horizontaler abzuleiten. Man trägt die Größe der für letztere gültigen Ordinaten ohne weiteres unverändert von der schiefen Ebene in der zugehörigen auf geneigter Fläche gemessenen Entfernung x von der Brunnenachse aus auf.

Sind zwei Beobachtungen $x = a_1$, $y = h_1$; $x = a$, $y = h$ zusammengehörig für denselben Gleichgewichtszustand, so folgt weiter aus Gleichung (7):

$$\varepsilon = \frac{q}{\pi} \frac{(ln a_1 - ln a)}{(h_1^2 - h^2)} = \frac{q\,(ln a_1 - ln a)}{\pi\,(h_1 + h)\,(h_1 - h)} = \frac{q\,(ln a_1 - ln a)}{\pi\,(h_1 + h)\,(s - s_1)} \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Eine andere Beweisführung, daß unter gleichen Voraussetzungen an der Gesamtergiebigkeit eines Brunnens nichts geändert wird, mag er sich im ruhenden oder fließenden Wasser befinden, ist folgende:*)

Bezeichnet v die im Grundwasser dem natürlichen Gefälle i entsprechende Geschwindigkeit, bezogen auf die Durchgangsfläche und v_1 die durch die künstliche Absenkung im Brunnen erzeugte, radial auf die Brunnenachse gerichtete Eintrittsgeschwindigkeit, dann gilt im Hinblick auf nachstehende Fig. 4, wenn $v = 0$ für die Eintrittsmenge:

$$q_1 = 2 \pi r m v_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

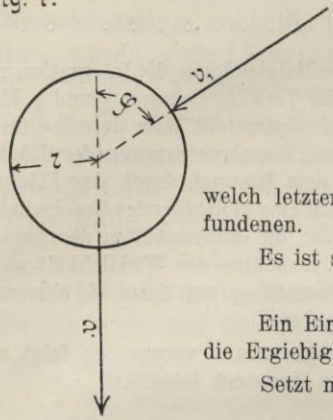
unter m den Wasserstand im Brunnen verstanden.

---

*) Siehe A. Thiem, Ergiebigkeit artesischer Bohrlöcher, Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, Jahrgang 1870.

Wirken jedoch beide Geschwindigkeiten v und v_1 gleichzeitig, dann empfängt jedes senkrechte Flächendifferential $mrd\varphi$ am Brunnenumfang die Wassermenge

Fig. 4.



$$dq = mrd\varphi v_1 + mrd\varphi v \cos\varphi \quad . \quad . \quad (10)$$

Für den ganzen Umfang folgt demnach:

$$\int_0^q dq = mrv_1 \int_0^{2\pi} d\varphi + mrv \int_0^{2\pi} \cos\varphi \,.\, d\varphi \quad . \quad (11)$$

$$q = 2\pi rmv_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

welch letzter Wert identisch ist mit dem in Gleichung (9) gefundenen.

Es ist somit

$$q = q_1 . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

Ein Einfluß der natürlichen Grundwassergeschwindigkeit auf die Ergiebigkeit eines Brunnens ist demnach nicht vorhanden.

Setzt man gemäß dem Darcyschen Grundgesetz

$$v = \varepsilon i \quad \text{und} \quad v_1 = \varepsilon \frac{dy}{dx};$$

führt man ferner statt mr den allgemeinen Wert yx ein, so entsteht die ganz analoge Beziehung wie bei Gleichung (5):

$$dq = \varepsilon xy \frac{dy}{dx} d\varphi + \varepsilon xyi \cos\varphi \,.\, d\varphi.$$

Ein anderer Beweis für die Richtigkeit dieses Ergebnisses ist noch folgender (Lueger, Wasserversorgung der Städte, S. 454): Mit Beibehaltung der früheren Bezeichnungen auf S. 8 ist die Gleichung der Depressionsfläche, die im Untergrunde bei freiem Spiegel durch die Entnahme der Menge q im strömenden Grundwasser erzeugt wird,

$$y^2 = \frac{q}{\varepsilon\pi} ln \sqrt{x^2 \cos^2\gamma \cos^2\varphi + z^2} + C \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

worin z den Abstand eines Flächenpunktes von der xy-Ebene bedeutet.

Für den Wurzelwert kann man jedoch, wie Fig. 1 bis 3 lehren, $x \,.\, \cos\gamma$ setzen und da $\cos\gamma$ wie schon bewiesen $\frac{1}{\sqrt{1 + i^2 \cos^2\varphi}}$ und $i^2 \,.\, \cos^2\varphi$ gegenüber 1 verschwindend klein ist, so vereinfacht sich Gleichung (14) zu der bekannten analogen Beziehung

$$y^2 = \frac{q}{\varepsilon\pi} lnx + C.$$

Gleichung (8) liefert den Beweis, daß es für die Ermittlung von ε der Kenntnis des natürlichen Gefälles vom Grundwasserstrom gar nicht bedarf und die Feststellung der Durchlässigkeit bei jeder Spiegellage erfolgen kann. Außerdem ist die Lage der geraden Verbindungslinie des Brunnens mit den Beobachtungsrohren ohne Einfluß auf den Wert von ε; es genügt in irgend einem Profil zu dem sich einstellenden natürlichen Grundwasserspiegel eine Parallele durch den Schnittpunkt der Brunnenachse mit der undurchlässigen Sohlenfläche als Abszisse zu benutzen. Fällt die Verbindungslinie mit der Stromrichtung des Grundwasserspiegels zusammen, so stellt dieser im Profil das im Untergrund herrschende größte Gefälle vor; wird hingegen ein Schnitt parallel zur Streichlinie geführt, so erscheint im Bilde der Grundwasserspiegel als eine Horizontale.

Befindet sich das auf dem Felde fließende Grundwasser unter Spannung, hat es, wie man zu sagen pflegt, artesische Eigenschaften, so gelten für solche Zustände bei der analytischen Ableitung von ε ganz dieselben Betrachtungen wie bei den freien Spiegeln. (Vergl. Fig. 5, 6 und 7.)

Fig. 5.

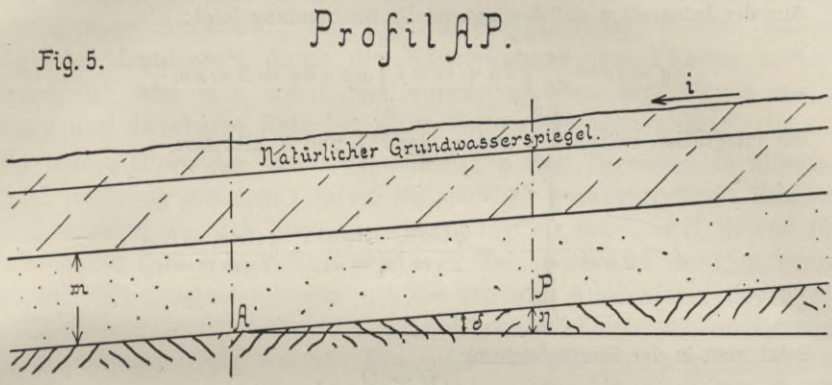


Fig. 6.

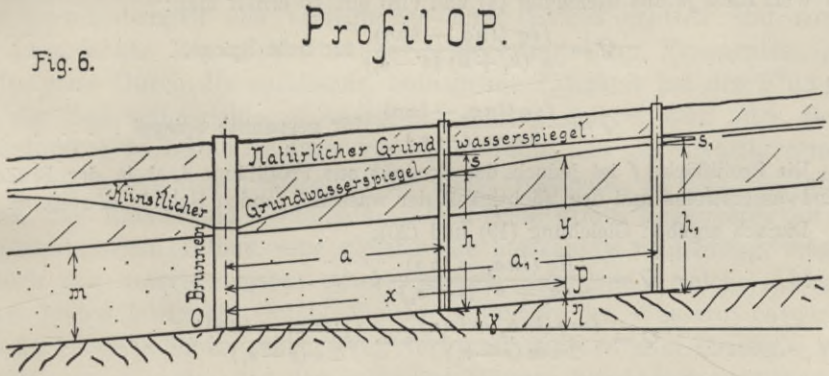
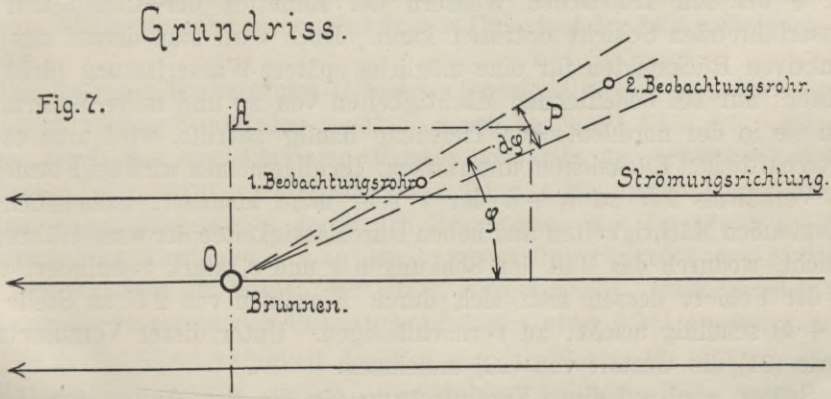


Fig. 7.



Im Längsprofil ist gegen früher an die Stelle der innerhalb des Depressionskegels veränderlichen Mächtigkeit der wasserführenden Schicht ein konstantes Durchflußprofil von der Höhe m getreten. Sonst ergibt sich im Anschluß an die früheren Erklärungen analog Gleichung (3):

$$dq = \varepsilon\, x \cos\gamma\, d\varphi\, m \frac{d\,(y + x \sin\gamma)}{d\,(x \cos\gamma)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

Fernerhin ergibt sich bei kleinem γ:

$$dq = \varepsilon x m d\varphi \left(\frac{dy}{dx} + i \cos\varphi\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (16)$$

Aus der Integration auf den ganzen Brunnenumfang folgt:

$$q = \varepsilon x m \frac{dy}{dx} \int_0^{2\pi} d\varphi + \varepsilon x m i \int_0^{2\pi} \cos\varphi\, d\varphi = 2\pi\varepsilon x m \frac{dy}{dx} \quad \ldots\ldots \quad (17)$$

Die Integration zwischen a und a_1, bezw. h und h_1 gibt für:

$$\varepsilon = \frac{q}{2\pi m} \frac{\int_a^{a_1} \frac{dx}{x}}{\int_h^{h_1} dy} = \frac{q\,(lna_1 - lna)}{2\pi m\,(h_1 - h)} = \frac{q\,(lna_1 - lna)}{2\pi m\,(s - s_1)} \quad \ldots\ldots \quad (18)$$

Setzt man in der Hauptgleichung

$$\varepsilon i f = Q$$

den Wert für ε je aus Gleichung (8) und (18) ein, so erhält man:

$$Q = \frac{fiq\,(lna_1 - lna)}{\pi\,(h_1 + h)\,(s - s_1)} \text{ für freie Spiegel} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (19)$$

und

$$Q = \frac{fiq\,(lna_1 - lna)}{2\pi m\,(s - s_1)} \text{ für gespannte Spiegel} \quad \ldots\ldots \quad (20)$$

Die Profilfläche f ist jedoch das Produkt aus Profillänge l, d. h. der Breite des Grundwasserstroms und der Mächtigkeit der wasserführenden Schicht H resp. m.

Danach ergeben Gleichung (19) und (20):

$$Q = \frac{lHq\,(lna_1 - lna)}{\pi\,(h_1 + h)\,(s - s_1)}\, i \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (21)$$

$$Q = \frac{lmq\,(lna_1 - lna)}{2\pi m\,(s - s_1)}\, i = \frac{lq\,(lna_1 - lna)}{2\pi\,(s - s_1)}\, i \quad \ldots\ldots\ldots \quad (22)$$

Aus Gleichung (22) geht somit hervor, daß man für die Auswertung von Q bei den artesischen Wässern der Kenntnis der Mächtigkeit der wasserführenden Schicht entraten kann. Doch wird man darauf aus konstruktiven Rücksichten für eine mögliche spätere Wasserfassung nicht verzichten; nur bei bedeutenden Mächtigkeiten von 20 und mehr Metern, wie man sie in der norddeutschen Tiefebene häufig antrifft, wird man es aus wirtschaftlichen Rücksichten unterlassen. Im allgemeinen wird bei Formel (21) das Verhältnis $2H$ zu $h_1 + h$ der 1 sehr nahe kommen; namentlich bei bedeutenden Mächtigkeiten und hohen Durchlässigkeiten der wasserführenden Schicht, wodurch das Maß der Senkungen s und s_1 stark vermindert wird, ist der Fehler, dessen man sich durch Einsetzen von $2H$ an Stelle von $(h_1 + h)$ schuldig macht, zu vernachlässigen. Unter dieser Voraussetzung würde (21) die Gestalt von (22) annehmen.

Später wird auf diese Vereinfachung für die Berechnung der Grundwassermengen zurückgekommen und die Größe des entstehenden Fehlers beim Gebrauch der Formel (22) für bestimmte Fälle zahlenmäßig ausgewertet werden.

b) Die praktische Anwendung auf das Isertal bei Alt-Bunzlau.

α) Das Untersuchungsgebiet.

Die Bodenoberfläche am Unterlaufe der Iser (Blatt 1) zeigt durch die terrassenförmige Ausbildung der das Tal einsäumenden Hänge, daß das Gepräge der Landschaft durch die Einwirkungen des Flusses zustande gekommen ist und sich somit von vornherein dem Hydrologen als ein günstiges und dankbares Feld für seine Untersuchungen anzeigt.

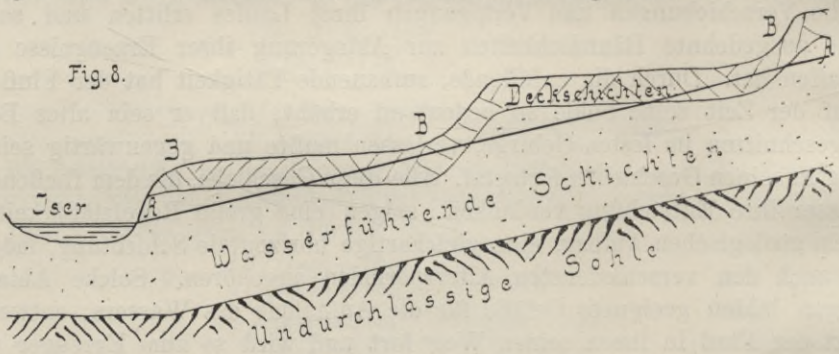
An beiden Ufern der Iser sind namentlich zwei Terrassen in allgemein paralleler Richtung mit dem Flußverlauf deutlich ausgesprochen. Unmittelbar steil erheben sie sich über ihre Umgebung bis zu einer Höhe von 10 m und das durch ihre Umrandung gebildete, auf Blatt 1 in dunkler Tönung dargestellte Flächengebiet bezeichnet die seitliche Ausdehnung des Feldes, innerhalb dessen in früheren, und zwar diluvialen Zeiten die erodierenden Kräfte des Flusses tätig waren. Ein Blick auf die Karte lehrt, daß die Iser infolge ihrer starken Geschiebeführung und ihres bedeutenden Gefälles große Verschiebungen und Verlegungen ihres Laufes erlitten und somit weit ausgedehnte Räumlichkeiten zur Ablagerung ihrer Erzeugnisse geschaffen hat. Durch die anfüllende, aufbauende Tätigkeit hat der Fluß im Lauf der Zeit seine Sohle so bedeutend erhöht, daß er sein altes Bett, eingeschnitten im festen Gebirge, verlassen mußte und gegenwärtig seinen Weg in seinen Geschieben fortsetzt. Alle diese Geschiebe, die dem fließenden Wasser ihre Entstehung verdanken, zeigen eine große Regelmäßigkeit in ihrem geologischen Aufbau, eine gleichartige horizontale Schichtung, mögen sie auch den verschiedensten Altersperioden angehören. Solche Ablagerungen bilden geeignete Gefäße für die Aufnahme des Wassers; entweder setzt der Fluß in ihnen seinen Weg fort und wird so zum Erzeuger von Grundwasser, oder das von den seitlichen Hängen herabkommende Wasser ergießt sich in dieselben, um im sichtbar fließenden Strom seinen Lauf zu beenden, welch letztere Erscheinung in dem Unterlauf der Iser vorherrschend auftritt.

Die örtlichen Grenzen des Gebietes, innerhalb dessen sich die Untersuchungen vollzogen, wurden westlich durch das linke Ufer des jetzigen, östlich durch das des diluvialen Flusses gebildet; die Arbeitsstellen beschränkten sich somit auf die durchschnittlich 1 km breite Talniederung; nördlich wie südlich wurde durch das Herantreten der die Flußgeschiebe einschließenden Terrassen bis an das gegenwärtige Flußufer der Ausdehnung der Arbeiten ein natürlicher Riegel vorgeschoben, wodurch sich für die Längenausdehnung des Untersuchungsfeldes etwa 6 km ergaben.

Die große Gleichmäßigkeit des Aufbaues der Geschiebe im Untergrund erhellt aus Blatt 2, das ein geologisches und hydraulisches, durch eine Anzahl von Bohrungen parallel mit dem Iserfluß gelegtes Profil zur Anschauung bringt. Die ganze Niederung ist bedeckt von einer Mutterbodenschicht, deren Stärke zwischen 20 und 60 cm schwankt; unterlagert wird

sie zum Teil von einer Lehmschicht bis zu einer Mächtigkeit von 1,50 m, zum Teil bilden sofort die quartären Ablagerungen das Liegende. Die erbohrten, wasserführenden Schichten bestanden aus diluvialen Sanden, Kiesen und Granden in den verschiedensten Korngrößen, vom feinen Sand bis zum faustgroßen Schotter wechselnd; zum Teil waren die einzelnen Kornelemente stark miteinander gemischt, jedoch waren sie frei von allen undurchlässigen lehmigen Einlagerungen, und der hydraulische Zusammenhang erlitt nirgends eine störende Unterbrechung. Hierdurch wurde für alle Spiegel der Nachweis der Zugehörigkeit zu einem einheitlichen Grundwasserstrom erbracht und somit der Systematik und Methodik zur Erkenntnis der tatsächlichen Zustände ein Erfolg versprechendes Feld geöffnet.

Eine kleine örtliche, für das Allgemeinverhalten belanglose Störung zeigte sich nur im südlichsten Teile des Arbeitsfeldes, wo es durch seitliche Einschwemmung zur Ausbildung einer oberen, geringfügigen, wasserführenden, linsenartigen Schicht kam. Die durch den Bohrer aufgedeckten Spiegel waren teils in freiem, teils in gespanntem Zustand. Denn während die Spiegelebene des Grundwassers, in nachstehender Fig. 8 mit AA bezeichnet,



im allgemeinen die Gestalt mehr einer der Iser zugeneigten Fläche annimmt, vollzieht sich die Steigung des Geländes BB landeinwärts sprungweise in starken Gefällsbrüchen durch die Ausbildung der terrassenförmigen Erhebungen. Je näher dem Fuß solcher Terrassen, um so mehr rückt der Grundwasserspiegel im Untergrund an die Unterfläche der Deckschicht; er erreicht sie, jedoch ist es ihm nicht möglich wegen ihrer Undurchlässigkeit in sie einzudringen; er ist darum gezwungen, von dem freien in den gespannten Zustand überzugehen. Einen Beweis für die Richtigkeit der Anschauung gibt ein Vergleich zwischen dem Lageplan auf Blatt 1 mit dem Profil auf Blatt 2.

Im südlichen Teil des Feldes mußten die Bohrungen wegen der geringen Breiteentwicklung der Talniederung bis an den Terrassenfuß herangeschoben werden, im nördlichen hingegen nicht. Die Folge davon war ein Wechsel freier und manometrischer Spiegel. Weiterhin lehrt das Profil auf Blatt 2, daß die Grundwasserspiegel eine höhere Lage besitzen als die benachbarten Iserspiegel. Somit befindet sich das Wasser des Untergrundes auf Grund einer einfachen Kausalität in Bewegung, in der Richtung auf

den Fluß zu, der damit zum Empfänger des Grundwasserstromes wird; Sinn, Größe und wahre Richtung der Strömung ergibt sich nicht ohne weiteres aus dem Profil.

Die undurchlässige, wassertragende Sohle besteht aus turonen, stark kalkhaltigen Mergeln, die jedoch nur in geringer Mächtigkeit angebohrt wurden.

β) Die Versuchsanordnung.

Legt man senkrecht zur herrschenden Strömungsrichtung eines sichtbar fließenden Gewässers ein Profil, dessen Fläche man aufmißt und stellt mit Hilfe der bekannten Meßvorrichtungen die im Profil senkrecht auf dasselbe herrschende mittlere Geschwindigkeit fest, so ergibt das Produkt aus Fläche und Geschwindigkeit die gesuchte Wassermenge. Auf gleichem Wege muß bei der Bestimmung der Ergiebigkeit eines Grundwasserstromes vorgegangen werden.

Die beste Kenntnis über das Spiegelrelief im Untergrund verschafft man sich mit Hilfe eines Höhenschichtenplanes des natürlichen Grundwasserspiegels, zu dessen Aufstellung man sich bereits vorhandener Brunnen bedienen kann. Je mehr sich der Profilzug in seinem Verlauf einer im übrigen beliebigen Horizontalkurve des Schichtenplanes nähert, um so vollkommener wird man der Bedingung nahe kommen, daß die Profilfläche den Grundwasserstrom rechtwinklig schneide. In Wirklichkeit wird dieses jedoch aus verschiedenen Rücksichten nicht möglich sein, wenn man sich auch bemühen wird, diesem Umstand möglichst gerecht zu werden.

Der weitere Verlauf der Untersuchung verlangt, eine gewisse Anzahl von Bohrlöchern in Rohrbrunnen zu verwandeln, um sie mittels einer Pumpe auf ihre Ergiebigkeit zu beanspruchen. Aus diesem Grunde soll die größte Tiefe des Grundwasserspiegels unter Flur nicht mehr betragen, als die mit einer Pumpe zu überwindende Saugwasserhöhe; sie muß sogar ein bis zwei Meter weniger sein, um im Rohrbrunnen eine entsprechende Senkung hervorrufen zu können. Des weiteren erfordert die Platzwahl für die Bohrungen die Möglichkeit, das während der Versuchsdauer von mehreren Stunden geförderte Wasser gut ableiten zu können, damit es nicht infolge mangelnder Vorflut durch Stillstand in die Deckschichten des Terrains einsickere und den Grundwasserspiegel beeinflusse. Störend für die freie Wahl des Profilzuges war ferner die Nachbarschaft der Iser, oder richtiger die der steil aufragenden Terrassen, die es nicht zuließen, den Standort der Bohrungen in eine solche Entfernung vom Fluß zu rücken, um die Größe ihrer Spiegelschwankungen, die von dem wiederholten Steigen und Fallen der Iser stark abhängig waren, auf ein möglichst geringes Maß zu beschränken. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden wir erkennen, wie gerade dieser mißliche Umstand, dessen Vermeidung nicht möglich war, den sicheren Rechnungsgang zum Teil erschwerte. Auch rein konstruktive Überlegungen spielten bei der Festsetzung des Profilzuges eine Rolle, um späterhin dem

projektierenden Ingenieur für die Wahl des zukünftigen Fassungszuges eine begründete Unterlage zu verschaffen.

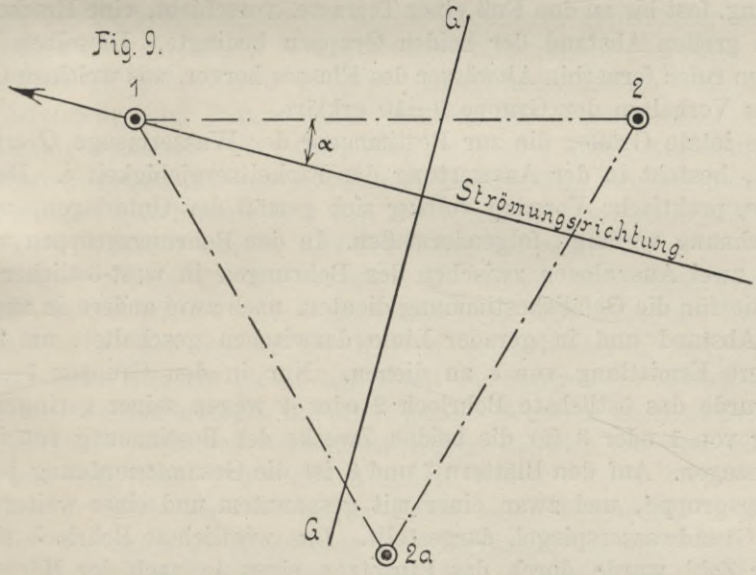
Ist endlich der Profilzug nach Überwindung der mannigfachen Schwierigkeiten im allgemeinen festgelegt, dann erfolgt durch Bohrungen die Ermittlung der Mächtigkeit der wasserführenden Schichten an verschiedenen Punkten. Wenn nicht andere zwingende Gründe maßgebend sind, wird man die Abstände der Bohrlöcher längs des Profilverlaufes gleichmäßig annehmen. Ein absolutes Maß für diese Entfernungen läßt sich von vornherein nicht geben. Man wird natürlich in solchen Ablagerungen, deren Aufbau der stauchenden, schiebenden, quetschenden Wirkung des Eises seinen Ursprung verdankt, entsprechend der großen Regellosigkeit im Untergrund, die Abstände klein wählen; haben diese glazialen Bildungen noch Transport durch Wasser erlitten, dann kann man schon etwas weiter greifen; zeigen jedoch die Geschiebe fluviatilen Charakter, dann wird man große Abstände verantworten können, denn dann ist es auch möglich, aus einer Summe von Einzelerscheinungen mit großer Sicherheit auf das Allgemeinverhalten zu schließen. Blatt 1 gibt den gewählten und zur Untersuchung benutzten Profilzug mit den Standorten der Bohrungen an; auf einer Länge von etwas über 6 km wurden 10 Bohrlöcher mit den ungeraden Zahlenbenennungen 1 bis 19 bis auf die undurchlässige Sohle niedergebracht. Der gegenseitige Abstand betrug im Mittel 674 m, seinen größten Wert erreichte er zwischen Bohrloch 3 und 5 mit 880 m. Die Ergebnisse sind auf Blatt 2, „Geologisches und hydraulisches Profil“, zusammengefaßt und zeugen von einer großen Klarheit und Regelmäßigkeit im Schichtenaufbau.

Die weitere Berechnung der Wassermenge im Untergrund erfordert die Kenntnis der Geschwindigkeit, bezogen auf die benetzte Fläche, eine Größe, die jedoch nicht direkt gewonnen werden kann. An ihre Stelle kann, wie früher gezeigt, das Produkt aus Gefälle und Einheitsergiebigkeit treten.

Die Gefällsauswertung erfolgte innerhalb des Profilzuges an denselben Standorten, wo die Mächtigkeit der wasserführenden Schicht ermittelt wurde. Eine genaue Befolgung der in der Formel ausgedrückten Bedingung, das herrschende größte Gefälle in der Profilfläche zu bestimmen, in der die durchfließende Menge Q nachgewiesen werden soll, ist nicht ganz einzuhalten. Um der Wahrheit möglichst nahe zu kommen, wird man den Abstand der Spiegelaufdeckungen, aus deren Ergebnis das Gefälle abgeleitet werden soll, nicht zu groß nehmen, um auf diese Weise weniger den Änderungen in der gleichförmigen Beschaffenheit des Untergrundes ausgesetzt zu sein. Hingegen ist es einleuchtend, daß ein gewisses Maß nicht überschritten werden darf, um nicht in die Gefahr zu kommen, bei den unvermeidlichen Messungsfehlern die Sicherheit der Rechnung zu beeinträchtigen. Es sind weniger die Fehler, denen man bei der gebräuchlichen Meßmethode ausgesetzt ist, viel mehr beeinflussen kleine Störungen der in den Beobachtungsrohren zu messenden Spiegel, die von der ihnen tatsächlich zukommenden hydraulischen Lage mehrere Millimeter, sei es nach oben,

sei es nach unten, abweichen, bei zu geringen Abständen der Beobachtungsorte das Endresultat erheblich, so daß man besonders bei unbedeutenden Gefällen keine sicheren Werte für die Rechnungen erhält. Die Fehler werden darum mit größerer Zunahme der Entfernung auf ein geringes verschwindendes Maß herabgedrückt. Außerdem sollte das Gefälle auf dem Wege des kürzesten Falles, d. h. in der Strömungsrichtung ermittelt werden, eine Bedingung, der bei der Unkenntnis der Grundwasserströmung nicht vollkommen nachgekommen werden kann. Man wird in allen Fällen, in denen die Vermutung eines stärkeren Wechsels der Strömungsrichtungen nahe liegt, zur möglichst genauen Bestimmung von i drei Spiegelaufdeckungen in die Spitze eines, wenn tunlich gleichseitigen Dreiecks anordnen und aus ihrer gegenseitig nivellitisch bestimmten Höhenlage auf dem herkömmlichen Wege einen Höhenschichtenplan der Grundwasserspiegel auf örtlich beschränktem Gebiet konstruieren. Im vorliegenden Falle wurde dieses Verfahren gleichmäßig durchgeführt. Die Bohrungen mit den ungeraden Nummern

Fig. 9.



erhielten in östlicher Richtung, als der wahrscheinlichen Strömungsrichtung, da der Fluß mit seinem nord-südlichen Verlauf als Grundwasserempfänger gelten konnte, eine weitere Spiegelaufdeckung mit geraden Nummern; außerhalb der Verbindungslinie beider wurde ein drittes Bohrloch niedergebracht. Der gesamten Anordnung wurde der Name einer Gruppe beigelegt. Die Ermittlung des größten Gefälles aus den Spiegelaufdeckungen dieser Bohrlöcher vollzieht sich auf folgendem Wege: Aus den Spiegelhöhen der drei Bohrlöcher 1, 2 und 2a wurde die Grundwasserhorizontale $G\,G$ abgeleitet; eine von 1 auf sie gefällte Senkrechte bezeichnet die Strömungsrichtung, die mit der Verbindungslinie 1—2 den Winkel α einschließt. Der Quotient aus der zwischen 1 und 2 gefundenen Gefällsgröße und dem Cosinus α gibt sofort das in die Rechnung für die Wassermenge Q einzusetzende i.

Auf Blatt 1 ist die gegenseitige Lage der 10 Bohrungsgruppen zueinander dargestellt; in größerem Maßstabe wurden zwei von ihnen auf den Blättern 7 und 8 gesondert eingezeichnet mit Angabe der Entfernung innerhalb der Gruppe. Je am Tage ihrer Untersuchung wurde die Abweichung der Strömungsrichtung von der Verbindungslinie der Beobachtungsrohre ermittelt, und daraufhin die Ergebnisse auf Blatt 3, Lageplan der Bohrungen und Profilzüge, übersichtlich zusammengestellt. Die je durch den Schwerpunkt einer Gruppe gezogenen Pfeile geben die jeweilige Richtung des größten Gefälles an, und sie bestätigen die schon früher ausgesprochene Vermutung, daß sich der Grundwasserstrom, von den Hängen kommend, beinahe rechtwinklig zum jeweilig herrschenden Flußverlauf in die Iser ergießt und dort seinen Weg beendet. Besonders charakteristisch für die Einwirkung des Flusses auf die Grundwasserverhältnisse ist der jähe Wechsel in den Gefällsrichtungen der Gruppe 3—4 und 5—6, innerhalb deren Entfernung die Iser ein stark gekrümmtes Knie in die Talniederung, fast bis an den Fuß einer Terrasse, vorschiebt, eine Erscheinung, die den großen Abstand der beiden Gruppen bedingte. Dieselben Veränderungen rufen fernerhin Altwässer des Flusses hervor, aus welchem Grunde sich das Verhalten der Gruppe 9—10 erklärt.

Die letzte Größe, die zur Bestimmung der Wassermenge Q erforderlich ist, besteht in der Auswertung der Einheitsergiebigkeit ε. Der notwendige, praktische Vorgang vollzog sich gemäß der Unterlagen, wie sie die Rechnung verlangt, folgendermaßen. In den Bohrungsgruppen wurden bis auf zwei Ausnahmen zwischen den Bohrungen in west-östlicher Richtung, die für die Gefällsbestimmung dienten, noch zwei andere in angemessenem Abstand und in gerader Linie dazwischen geschaltet, um für die besondere Ermittlung von ε zu dienen. Nur in den Gruppen 1—2 und 3—4 wurde das östlichste Bohrloch 2 oder 4 wegen seiner geringen Entfernung von 1 oder 3 für die beiden Zwecke der Bestimmung von i und ε herangezogen. Auf den Blättern 7 und 8 ist die Gesamtanordnung je einer Bohrungsgruppe, und zwar einer mit gespanntem und einer weiteren mit freiem Grundwasserspiegel, dargestellt. Das westlichste Bohrloch mit ungerader Zahl wurde durch das Einsetzen eines je nach der Mächtigkeit der wasserführenden Schicht 4 oder 5 m langen Filterkorbes in einen Rohrbrunnen verwandelt. Je nach der Korngröße und Beschaffenheit des erbohrten Materials wechselte die Maschenweite des das Filterkorbgerippe ummantelnden Gewebes. Die übrigen Bohrlöcher, mochten sie entweder der Gefälls- oder der Ergiebigkeitsbestimmung dienen, wurden mit $^5/_4$zölligen Beobachtungsrohren ausgerüstet, an deren unteren Enden sich ein Filterstutzen von 30 cm Länge befand. Für fernere Untersuchungen dürften sich Filterstutzen von mindestens 1 m Länge empfehlen. Solche, die die ganze wasserführende Schicht durchfahren, wären am vorteilhaftesten; hingegen verbietet ihre Kostspieligkeit eine ausgedehnte Anwendung. Vor Beginn eines jeden Versuches wurde die Echtheit der sich in den Beobachtungsrohren einstellenden Spiegel durch Beanspruchung mittels einer

kleinen Handpumpe geprüft. War der Spiegel echt, so durften sowohl vor Beginn des Pumpens, wie kurze Zeit nach ihm die vom Rohrkopf genommenen Abstiche keine starken Differenzen aufweisen. Das anfänglich angewandte Verfahren, die Spiegel schon in den Bohrrohren von 270 mm lichter Weite für den Untersuchungsgang zu verwenden, erwies sich als unbrauchbar. Trotz des großen Rohrdurchmessers bestand nur selten ein inniger hydraulischer Zusammenhang zwischen dem Spiegel innerhalb des Rohres und dem außerhalb desselben. Nach Beendigung der Prüfung auf Echtheit wurden sämtliche Spiegel mindestens zwölf Stunden ungestört gelassen, ehe die Untersuchung einer Gruppe ihren Anfang nehmen durfte. Unmittelbar vor Beginn einer solchen wurde die Höhenlage der Spiegel in einer Gruppe nivellitisch genau bestimmt, und nach Erledigung dieser Arbeit begann sofort die künstliche Spiegelsenkung des Rohrbrunnens mit Hilfe einer zweistiefeligen Baupumpe. Die Dauer der Untersuchung währte 9 bis 10 Stunden. Innerhalb dieser Zeit wurden alle Viertelstunden mittels Gefäßes die Ergiebigkeitsmengen des Rohrbrunnens gleichzeitig mit seiner Spiegellage und derjenigen in den Beobachtungsrohren gemessen. Nur in den entfernten Bohrlöchern geschah immer halbstündlich eine Messung. Die Liefermenge der Pumpe wurde während der Versuchsdauer möglichst gleichmäßig gehalten. Es gelang dies am besten durch Aufstellung eines Metronoms, dessen für eine normale Arbeitsleistung eingestellten Pendelschwingungen gleichsinnig mit den Bewegungen des Pumpenkolbens sich vollzogen; im Mittel wurden 5,11 Sek.-Liter gefördert.

Vergleicht man die Spiegelgänge der beiden Bohrungsgruppen 1—2 und 15—16 auf Blatt 7 und 8 miteinander, so fällt sofort der bedeutende Unterschied in der Gestalt der Kurven bei artesischen und bei freien Spiegeln auf. Hier ein plötzlicher Abfall der Spiegel, fast gleichzeitig mit dem Pumpenbeginn und ein darauf folgendes Beharren an einer Stelle, dort ein allmählicher, stetiger Verlauf der Kurve, die sich mit dem einen Aste mehr und mehr einer Horizontalen nähert.

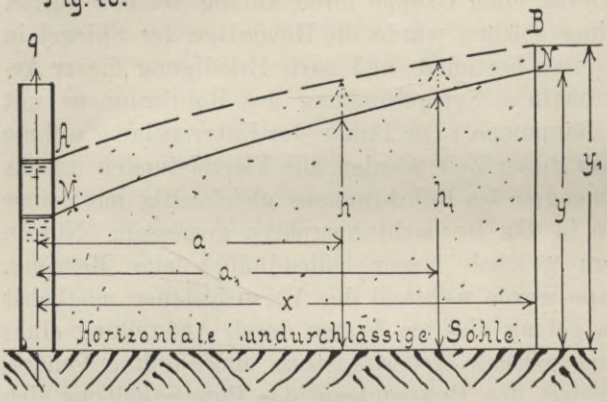
Dieses verschiedene Verhalten findet seine Erklärung in der Entwicklung des durch die Absenkung im Untergrund erzeugten Depressionskegels. Bei artesischen Wässern wird jede Änderung in der Spiegellage eines Bohrloches ihren Einfluß fast unmittelbar auf ihre Umgebung infolge der Druckspannung, unter der sich die Wassermoleküle befinden, äußern. Die Dauer der Übergangszustände wird eine verschwindende sein; der Beharrungszustand stellt sich meist sofort ein. Bei Spiegeln in freiem Zustand sind jedoch Hohlräume zu entwässern, deren zunehmende Ausdehnung sich radial vom Rohrbrunnen aus mit einer vom Material des Untergrundes abhängigen Geschwindigkeit vollzieht. Der Eintritt des Beharrungszustandes erfolgt nach einigen Stunden. Es ist demnach möglich, ohne jegliche Kenntnis der hydraulischen Untergrundverhältnisse aus der Kurvengestaltung der Spiegelgänge den Spannungszustand des Grundwassers abzuleiten.

γ) Fehlerquellen.

Die Anwendung der Formeln (8) und (18) setzen die genaue Kenntnis ihrer Bestimmungsgrößen voraus, die aus solchen Zuständen abgeleitet werden sollen, wie sie auf dem Wege des Versuchs nicht immer zu erreichen sind.

Die Formeln sind entwickelt unter der Voraussetzung des Beharrungszustandes; ist er beim Versuche nicht erreicht, so wird das Ergebnis von ε von dem wahren Wert abweichen müssen.

Fig. 10.



Die untere Kurve MN in nebenstehender Skizze gehöre dem Beharrungszustand an, der sich bei konstanter Entnahme der Wassermenge q aus dem Rohrbrunnen einstellen würde. Bei der Rechnung hingegen seien die Werte aus einem Übergangszustande zugrunde gelegt worden, dessen Kurvenbild durch die obere Linie AB dargestellt ist. Die beiderseitigen Ordinaten seien y und y_1, bezogen auf die horizontale Abszissenachse x. Gemäß Darcy gilt für den Beharrungszustand mit dem tatsächlichen Wert von ε

$$q = \varepsilon 2\pi x y \frac{dy}{dx},$$

somit

$$\varepsilon = \frac{q}{2\pi x y \frac{dy}{dx}} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (23)$$

Für den Übergangszustand gilt mit dem aus ihm berechneten Wert ε_1

$$q = \varepsilon_1 2\pi x y_1 \frac{dy_1}{dx}; \quad \varepsilon_1 = \frac{q}{2\pi x y_1 \frac{dy_1}{dx}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (24)$$

Die wahre Menge jedoch, die im Übergangszustand dem Brunnen zuströmt, ist mit dem wahren Wert ε

$$q_1 = \varepsilon 2\pi x y_1 \frac{dy_1}{dx}; \quad \varepsilon = \frac{q_1}{2\pi x y_1 \frac{dy_1}{dx}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (25)$$

Nach Division von Gleichung (25) durch (24) ergibt sich schließlich

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} = \frac{q_1}{q} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (26)$$

Es ist unmöglich, daß die Menge im Übergangszustand jemals einen größeren Wert besitzt als die Fördermenge q. In jedem Zeitelement dt wird sich die Übergangskurve um dy der Beharrungskurve nähern, darum muß sich die Menge q_1 nach Zurücklegung des Weges dx um dq_1 anreichern, bis $q_1 + \Sigma dq_1$ den Wert von q im Brunnen erreicht hat; somit ist bewiesen, daß $q > q_1$ und daß jedes im Übergangszustande ermittelte ε einen höheren Betrag besitzt, als das wahre dem Beharrungszustand zu-

kommende. Die Behauptung trifft indessen nur unter der Bedingung zu, daß der Schnitt mit der Depressionsfläche im Übergangszustand eine ähnliche Kurve zeigt, wie im Beharrungszustande, für den die früher entwickelten Gleichungen gelten. In diesem Falle würde man auch durch die reine Überlegung zu einem gleichen Schluß kommen. Ist in der Tat AB ein Übergangszustand, MN ein Beharrungszustand, so wird unter der obigen Annahme der Verlauf der Kurve AB stets flacher sein als jener der Kurve MN. Infolgedessen wird im ersten Falle auch die Differenz $h_1^2 - h^2$ kleiner sein als im zweiten. Da aber nach Formel (8) der Wert von

$$\varepsilon = \frac{q\,(ln a_1 - ln a)}{\pi\,(h_1^2 - h^2)}$$

ist, in dem sich bei konstanter Entnahme q, wie angenommen, nur $h_1^2 - h^2$ mit Annäherung an den Beharrungszustand ändert, bezw. vergrößert, so geht daraus hervor, daß man für ε vor Eintritt des Beharrungszustandes zu große Werte erhält.

In Wirklichkeit wird sich der Vorgang wohl so gestalten, daß die Vertikalschnittkurve durch die Depressionsfläche beim Übergang zum Beharrungszustand eine andere stetig sich ändernde Form zeigt, und darum auch nicht dieselbe Gleichung haben kann, wie die für letztere aufgestellte. Es liegt hier eine zum Beharrungszustand sich allmählich umbildende Wellenlinie vor, bei der zu den Veränderlichen noch die Zeit tritt; erst mit Einführung dieser Veränderlichen könnte man die richtige Form der Welle in den verschiedenen Perioden bis zum Beharrungszustand erfassen und sie vielleicht analytisch bestimmen.

Dieser Nachteil der einwandfreien Auswertung von ε würde die Anwendung dieses Verfahrens stark beeinträchtigen; jedoch ist er nur ein scheinbarer; man ersieht aus den Formeln (21) und (22), daß es für die Bestimmung von Q im Beharrungszustand nur der Unveränderlichkeit von $(s_1 - s)$ bedarf. Absolut richtig ist diese Behauptung für artesische Grundwässer, wie Formel (22) bestätigt. Für freie Spiegel wäre gemäß Gleichung (21) noch die Veränderlichkeit von $(h_1 + h)$ zu berücksichtigen; jedoch selbst große Änderungen dieses Wertes würden nur in unerheblichem und praktisch belanglosem Maße den Endwert von Q beeinflussen können. Es ist somit nur der unveränderliche Unterschied der Senkungsgrößen $(s_1 - s)$ maßgebend für die Ermittlung von ε. Wenn es auch nicht immer möglich ist, innerhalb der Versuchsdauer den absoluten Beharrungszustand zu gewinnen, so doch den relativen; und dies ist bei passend gewählten Entfernungen der Beobachtungsrohre immer zu ermöglichen. Die Erreichung des relativen Beharrungszustandes gibt sich zu erkennen durch einen nach mehrstündigem Ergiebigkeitsversuch eintretenden vollkommen gleichsinnigen Gangverlauf, der für die Messung der Größen s und s_1 dienenden Spiegel, die sich in den Entfernungen a und a_1 vom Rohrbrunnen befinden. Die beiden Spiegel können immerhin unter der Einwirkung der im Brunnen erzeugten Senkung eine Bewegung zeigen; jedoch ist deren Größe für jeden von ihnen beiden immer dieselbe und der Eintritt eines solchen Verhaltens ist mit „relativer Beharrungszustand“ bezeichnet; er ist ein Zeichen dafür, daß durch den Versuch der erstrebte Zweck erlangt wurde und durch seine Fortsetzung eine entschiedene Beeinflussung des Endergebnisses nicht zu erwarten wäre.

Auf dem Untersuchungsfelde ist es immer gelungen, selbst bei den freien Spiegeln, wo Hohlräume im Untergrund erst geschaffen werden mußten, den relativen Beharrungszustand zu erreichen, wie die Spiegelgänge der Bohrungsgruppe 15—16 in anschaulicher Art beweisen. Für die Rechnung von ε wurden immer die Ergebnisse der dem Rohrbrunnen zunächst benachbarten Spiegel herangezogen; während des Versuches wurden jedoch auch die Einwirkungen der Spiegelsenkung entfernterer Bohrlöcher, die dem Zweck der Gefällsbestimmung innerhalb der Gruppe dienten, gemessen, um im Falle des Versagens einer Beobachtungsstelle sich an anderen einen Ersatz zu verschaffen, ein Vorkommnis, das jedoch nicht eintrat.

Auf den Blättern 7 und 8 sind übersichtlich die Untersuchungsergebnisse der beiden Bohrungsgruppen 1—2 und 15—16 dargestellt, zugleich mit der Angabe der Bestimmungsgrößen für die Auswertung von ε.

III. Die Berechnung der Grundwassermengen.

Der Bedingung, daß die Profilfläche senkrecht zur herrschenden Strömungsrichtung verlaufe, ist aus den verschiedensten, bereits erörterten Gründen nicht nachzukommen. Die geradlinige Verbindung zweier Bohrungsgruppen wird meist im schiefen Winkel die Horizontalkurven der Grundwasserspiegel schneiden; es diene darum nachstehendes, durch Zeichnung erläutertes Verfahren zur Auswertung der den einzelnen Gruppen zukommenden Längen der Profillinien. In jeder der drei Gruppen mit je drei Bohrungen, deren Verbindungslinien die Seiten eines fast gleichseitigen Dreiecks bilden, wurden aus den Spiegellagen die örtlichen Strömungsrichtungen bestimmt und durch den Mittelpunkt des Dreiecks hindurchgehend angenommen. Durch Außen- und Innenpolation je auf den Verbindungslinien der Bohrungen innerhalb einer Gruppe wurde der Höhenschichtenplan abgeleitet. Erleichternd für die Ermittlung des genauen Verlaufes der im Plan dargestellten Grundwasserhorizontalen kam die Bedingung hinzu, daß diese Kurven mit den Strömungslinien im Kreuzungspunkte senkrechte Schnitte bilden müssen. Durch die Mittelpunkte einer jeden Gruppe wurden alsdann Horizontalkurven, in Anpassung an die zunächst verlaufenden, in gestrichelter Linie eingezeichnet und durch eine auf die Horizontalkurven rechtwinklig gefällte Trajektorie zwischen je zwei Gruppen von genannter Linie gleiche Stücke abgeschnitten. Die einer Gruppe benachbarten Trajektorien kennzeichnen somit die Grenzen der ihr zukommenden Profillänge von der Größe $\lambda + \lambda_1$. Auf Blatt 3, Lageplan der Bohrungen und Profilzüge, ist das Ergebnis dieses Verfahrens auf dem Untersuchungsfelde dargestellt. Weiteres besagen die Erklärungen auf dem Plan selbst.

Die Länge der Profillinie 2λ zwischen zwei Gruppen ist somit abhängig von der Lage, der Größe und der Richtung der Strömung und

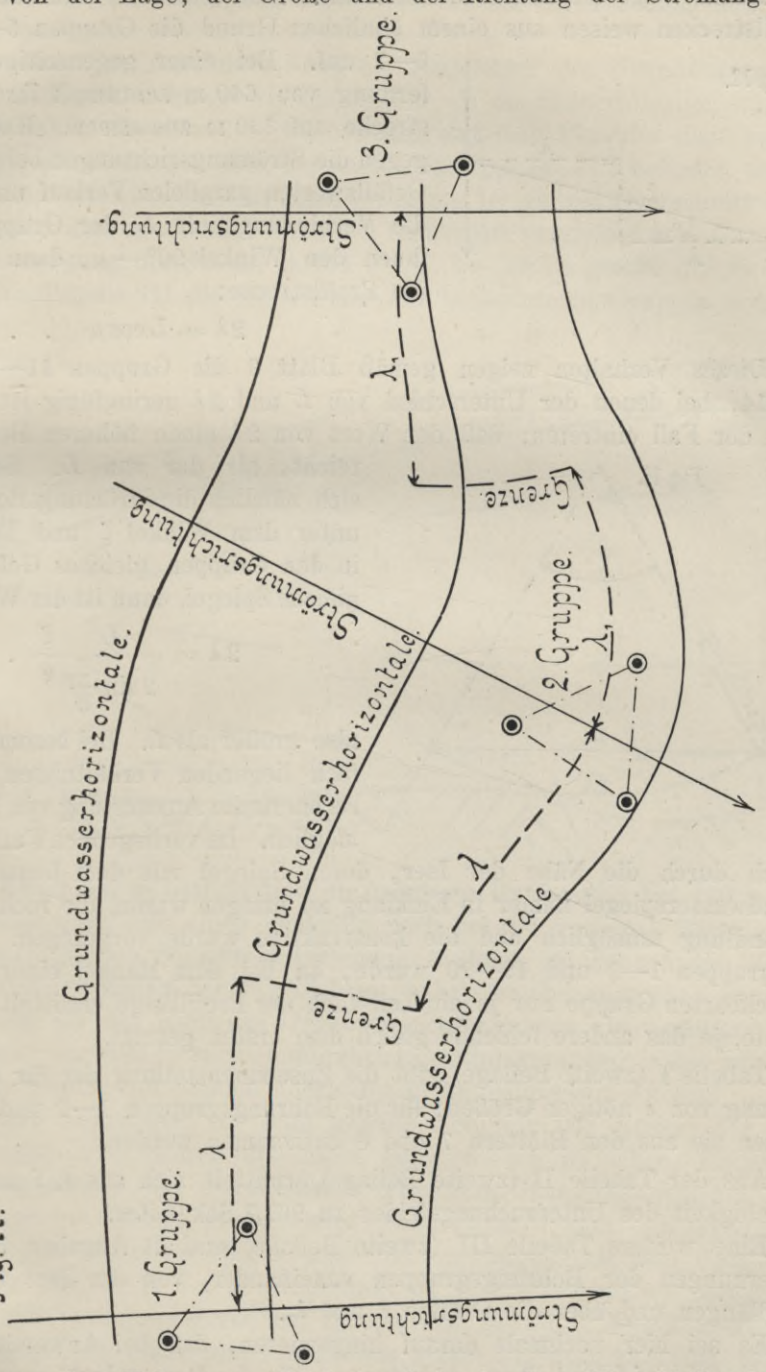
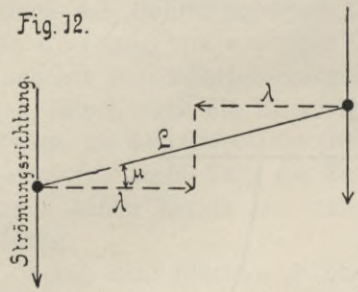


Fig. 11.

ferner von dem Höhenunterschied der Spiegel. Den Wert Null wird sie annehmen, falls die benachbarten Strömungsrichtungen sich in ihren Ver-

längerungen decken, ein Beweis, daß die Wassermenge der einen Gruppe auf ihrem Wege die andere durchströmt. Eine starke Verkürzung ihrer Profilstrecken weisen aus einem ähnlichen Grund die Gruppen 5—6 und 6—7 auf. Bei einer gegenseitigen Entfernung von 640 m schrumpft ihre Profilstrecke auf 320 m zusammen. Haben hingegen die Strömungsrichtungen bei gleichen Gefällswerten parallelen Verlauf und bildet die Verbindungslinie L der Gruppen mit ihnen den Winkel $90^0 - \mu$, dann beträgt die Profilstrecke:

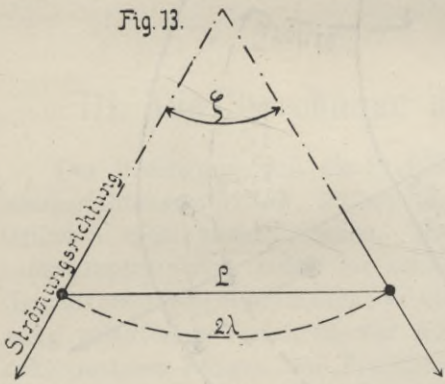
Fig. 12.



$$2\lambda = L \cos \mu \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

Dieses Verhalten zeigen gemäß Blatt 3 die Gruppen 11—12 und 13—14, bei denen der Unterschied von L und 2λ geringfügig ist. Auch kann der Fall eintreten, daß der Wert von 2λ einen höheren Betrag erreicht, als der von L. Schneiden sich nämlich die Strömungsrichtungen unter dem Winkel ζ und herrschen in den Gruppen gleiches Gefälle und gleiche Spiegel, dann ist der Wert von:

Fig. 13.



$$2\lambda = \frac{L}{2 \sin \frac{\zeta}{2}} \frac{\zeta}{\varrho} \quad . \quad . \quad (28)$$

also größer als L. Bei besonders einfach liegenden Verhältnissen ist die rechnerische Auswertung von 2λ wohl möglich. Im vorliegenden Falle wurde jedoch durch die Nähe der Iser, deren Spiegel mit dem benachbarten Grundwasserspiegel immer in Einklang zu bringen waren, die rechnerische Behandlung unmöglich und die konstruktive wurde vorgezogen. In den Endgruppen 1—2 und 19—20 wurde, da bei dem Mangel einer dritten benachbarten Gruppe nur je ein Teilstück der Profillänge ermittelt werden konnte, je das andere fehlende gleich dem ersten gesetzt.

Tabelle I (zweite Beilage) gibt die Zusammenstellung der für die Auswertung von ε nötigen Größen; für die Bohrungsgruppen 1—2 und 15—16 können sie aus den Blättern 7 und 8 entnommen werden.

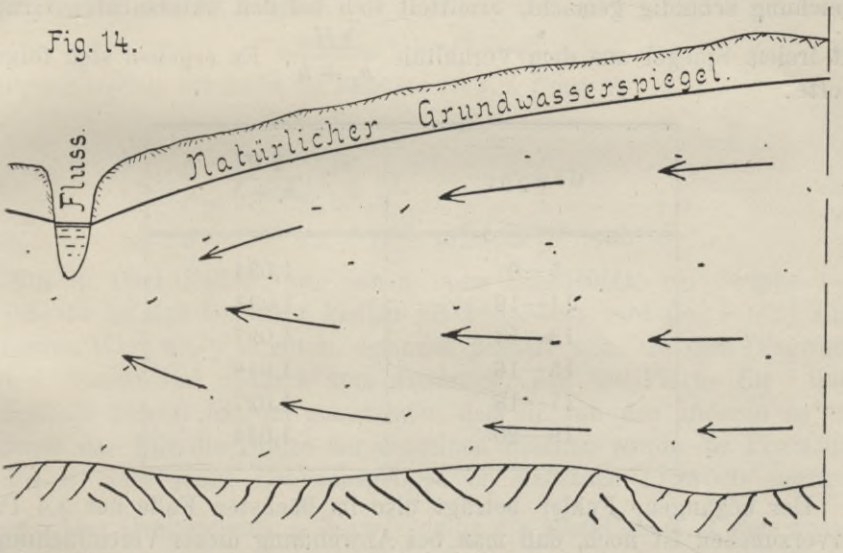
Aus der Tabelle II (zweite Beilage) ermittelt sich aus ε, i und f die Ergiebigkeit des Untersuchungsfeldes zu 262,7 Sek.-Liter.

Eine weitere Tabelle III (zweite Beilage) enthält Angaben über die Entfernungen der Bohrungsgruppen voneinander, von der Iser über die Profillängen und über die Größen λ und λ_1.

Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, daß bei Anwendung der Formel $Q = \varepsilon i f$ und ihrer Ableitungen die fundamentale Voraussetzung gemacht ist, daß in der von Grundwasser durchströmten, für die Berech-

nung verwandten Profilfläche die Geschwindigkeit in allen ihren Teilen die gleiche sei. Dieser Bedingung wird wohl nie ein Untersuchungsfeld vollkommen genügen.

Das Bett des Iserflusses, das als Empfänger des Grundwassers zu gelten hat, liegt durchweg erheblich höher als die undurchlässige, wassertragende Sohle. Je näher ein Beobachtungsort dem Flußufer liegt und je höher sich die Flußsohle über der undurchlässigen Schicht befindet, um so ungleichmäßiger wird die Durchflußbewegung im ganzen Querschnitt sein. Fig. 14 wird dies anschaulich erläutern (außerdem vergleiche man Lueger, Wasserversorgung der Städte, S. 464 u. f.). Da jedoch gemäß der zweiten Beilage in Tabelle III die Entfernung der beobachteten Gruppen von der



Iser im Mittel 357 m beträgt und die mindeste Entfernung auf 190 m zusammenschrumpft, also einen immerhin noch bei der geringen Mächtigkeit der wasserführenden Schicht bedeutenden Abstand, so können die Werte der Rechnungen denen der Wirklichkeit nahekommend angesehen werden, um so mehr als das Korn des Grundwasserträgers von gleichmäßiger Beschaffenheit war und störende undurchlässige Einlagerungen in den wasserführenden Kiesen und Sanden überhaupt nicht festgestellt wurden.

Weitere Bohrungen für eine genaue Kenntnis des Reliefs der undurchlässigen Sohle wären erwünscht gewesen, um zu sehen, inwieweit der Voraussetzung des Parallelismus zwischen Grundwasserspiegel und wassertragender Schicht genügt wird. Jedoch muß man bedenken, daß der praktische Hydrologe bei seinen Untersuchungen mit dem Geld und demgemäß mit der Zeit sehr beschränkt ist und sich bemühen muß, mit den ihm zur Verfügung gestellten Mitteln den gewollten Zweck möglichst zu erreichen. Er muß darum zufrieden sein, aus dem Ergebnis seiner Untersuchungen brauchbare und einwandfreie Mittelwerte zu erhalten, auf Grund deren er befähigt ist, weiter zu disponieren. So sehr auch manch-

mal weitere Aufklärungen und Aufschlüsse über das Verhalten des Untergrundes für eine Erweiterung der Erkenntnis angenehm wären, so muß man vielfach darauf verzichten, wenn derartige Arbeiten nicht geradezu unbedingt erforderlich sind und ihr Fehlen eine nicht auszufüllende Lücke der ganzen Untersuchung bedeuten würde. Aus diesen Gründen wurde von außerhalb der Gruppen liegenden Bohrungen abgesehen, da mit dem angewandten Untersuchungsverfahren der einem praktischen Bedürfnis dienende Zweck der Arbeit für erreichbar gehalten wurde.

Würde man in der Gleichung (21) im Nenner an die Stelle von $(h_1 + h)$ den Wert $2H$ einsetzen, so entsteht dieselbe Gleichung wie (22) und der prozentuale Fehler, dessen man sich bei Anwendung dieser vereinfachten Gleichung schuldig gemacht, ermittelt sich bei den untersuchten Gruppen mit freiem Spiegel aus dem Verhältnis $\frac{2H}{h_1 + h}$. Es ergeben sich folgende Werte:

Gruppe	$\frac{2H}{h_1 + h}$
5—6	1,034
11—12	1,033
13—14	1,027
15—16	1,018
17—18	1,027
19—20	1,014

Der begangene Fehler beträgt also im höchsten Falle nur 3,4 Proz.; hervorzuheben ist noch, daß man bei Anwendung dieser Vereinfachung zu niedrige Werte für Q ermittelt. Bei großen Mächtigkeiten der wasserführenden Schichten ist es demnach nicht unumgänglich notwendig, die Tiefe der wassertragenden Sohle zu ermitteln. Es genügt, die größte erbohrte Mächtigkeit des wasserführenden Mittels für die Rechnung zu verwenden.

Um eine bessere Übersicht der wechselnden Werte von ε, i, f und Q der gesamten Gruppen zu schaffen, wurde ein Diagramm der Ergiebigkeiten, Blatt 4, aufgezeichnet. Für die Darstellung wurde ein logarithmischer Maßstab benötigt, um es zu ermöglichen, den Beitrag jedes der drei einzelnen Faktoren in dem Produkt $\varepsilon i f$ zu dem Gesamtergebnis Q zu erkennen, jedoch so, daß die Summe der Beiträge zugleich den Wert von Q liefert. Für die Auffindung eines brauchbaren Maßstabes diente folgender Rechnungsweg.

Da die reinen Zahlenwerte von ε, i und Q von dem von f um mehrere Potenzen von 10 abweichen, mußten sie, um nur innerhalb enger Grenzen zu schwanken, für die graphische Darstellung im Maßstabe teils erhöht, teils erniedrigt werden. Statt

$$\varepsilon i f = Q$$

kann man auch setzen:

$$10^3 \varepsilon \,.\, 10^3 i \frac{f}{10^3} = 10^3 Q.$$

Nach Logarithmisierung dieses Ausdruckes kommt:

$$(\log \varepsilon + 3) + (\log i + 3) + (\log f - 3) = \log (Q + 3) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

Setzt man die in der Tabelle II angeführten Werte von ε, i, f und Q in (29) ein, so wird in dem Ergebnis eines einzelnen Summanden die Mantisse des Logarithmandus, abgesehen von zwei Ausnahmen, zwischen den Grenzen 0 und 1 schwanken, also brauchbare Zahlenwerte für ein Diagramm liefern können. Um jedoch eine Übereinstimmung der Einheit des Meters und der Sekunde auch in der Darstellung beibehalten zu können, würden jene Werte für ein Diagramm zu groß sein, und sie erfahren darum eine Reduktion durch eine Division mit 1000.

$$\frac{(\log \varepsilon + 3)}{1000} + \frac{(\log i + 3)}{1000} + \frac{(\log f - 3)}{1000} = \frac{(\log Q + 3)}{1000}.$$

Der Wert jedes einzelnen Postens sei als ein Flächenmaß in Quadratmeter dargestellt. Es gilt dann die Relation

$$x_0^{qm} + x_1^{qm} + x_2^{qm} = x^{qm} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30)$$

Hieraus ergeben sich leicht die Maßstäbe für ε, i, f und Q.

$$\varepsilon = 10^{1000 x_0} : 10^3$$

$$i = 10^{1000 x_1} : 10^3$$

$$f = 10^{1000 x_2} : 10^3$$

$$Q = 10^{1000 (x_0 + x_1 + x_2)} : 10^3 = 10^{1000 x} : 10^3.$$

Nur in zwei Fällen, wie schon oben angedeutet, bei Gruppe 1—2 und 19—20 ist das Gefälle i kleiner als $1\,^0/_{00}$, also wird $(\log i + 3)$ einen geringeren Wert als 0 erhalten, demnach negativ sein. In dem Diagramm, Blatt 4, kommt dies dadurch zum Ausdruck, daß die Fläche für i unter die Nullinie gesetzt ist, um anzuzeigen, daß sie von den anderen zu subtrahieren ist. Für die Breite der einzelnen Flächen wurde die Profillänge $l = \lambda + \lambda_1$ einer jeden Bohrungsgruppe im Maßstabe 1 : 25 000 zugrunde gelegt. Der Quotient aus $\frac{f}{l}$ bezw. $\frac{Q}{l}$ gibt die Mächtigkeit H der wasserführenden Schicht bezw. die Ergiebigkeit auf den laufenden Meter Profillänge.

IV. Wechselbeziehungen zwischen dem Flufs und dem Grundwasser.

Bei den geringen Entfernungen der Bohrungsgruppen von der Iser, die im Mittel 357 m betrugen, mußte bei der Durchlässigkeit des Flußbettes jeder Schwankungsgang der Spiegel die Bewegungsrichtung des Grundwassers beeinflussen und somit eine Änderung in seiner zeitlichen Ergiebigkeit hervorrufen. Die gegenseitige Höhenlage des Fluß- und Grundwasserspiegels ist maßgebend für die Bewegungserscheinungen im Untergrund. Ein Höhenschichtenplan der Grundwasserspiegel gibt sofort Aufschluß über Sinn, Richtung und Größe des Gefälles. Biegen die Horizontalkurven flußaufwärts um, gemäß nachstehender Fig. 15, so beenden sämtliche

Wasserfäden des Grundwasserstromes ihren Lauf im sichtbar fließenden Gewässer. Findet die umgekehrte Erscheinung statt, siehe Fig. 16, entfernen sich die Kurven stromaufwärts vom Flußbett, dann tritt Oberflächenwasser in den Untergrund ein, und der Fluß wird zum Erzeuger von Grundwasser. Tritt im ersten Falle plötzlich Hochwasser ein, so übt der Fluß infolge seiner höheren Spiegellage eine rückstauende Wirkung aus und verhindert nicht nur das Austreten von Grundwasser, sondern es tritt unter Umständen eine rückläufige Bewegung ein, die den Eintritt von Flußwasser in den benachbarten Untergrund hervorruft. Die Größe der Wirkungen einer Hochwasserwelle ist weniger abhängig von ihrer Menge, als vielmehr von ihrer relativen Spiegellage, von ihrer zeitlichen Dauer, von der Durchlässigkeit des Untergrundes und von dem Gefälle und der Ergiebigkeit des Grundwasserstromes. In

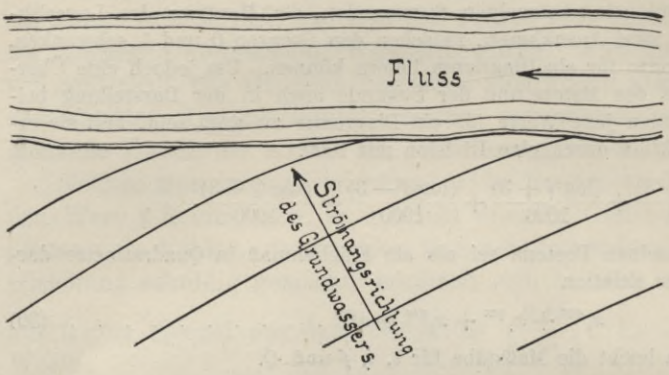


Fig. 15.

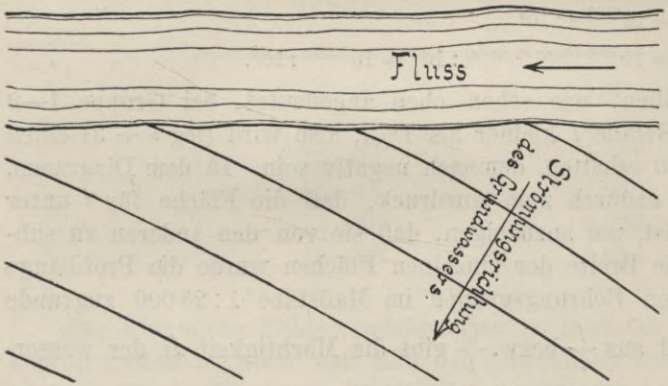


Fig. 16.

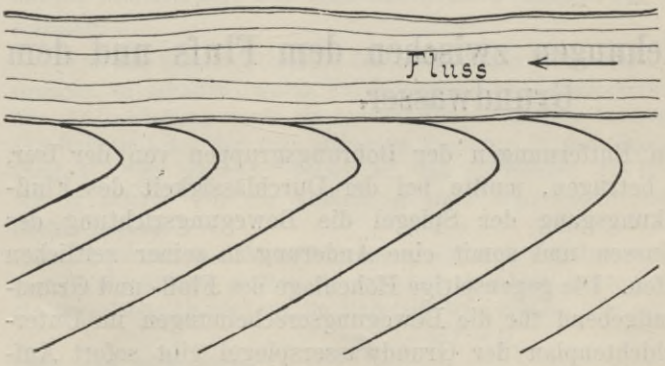


Fig. 17.

gleicher Weise ist die Zeit, in der sich dieser Einfluß des steigenden Flußspiegels binnenwärts geltend macht, von diesen Faktoren abhängig.

Die Einwirkung unter solchen Umständen auf das Spiegelrelief des Untergrundes stellt Fig. 17 dar, die nach dem Obigen beide, in Fig. 15 und 16 zur Anschauung gebrachten Erscheinungen in sich vereinigen muß. Die Kurvengestaltung weist die Bildung eines nach unten gehöhlten langgestreckten Raumes auf, an dessen Füllung sich Flußwasser und Grundwasser, ersteres allerdings in bedeutend stärkerem Maße beteiligen. Durch die Hebung des Flußspiegels wird an dem Wert der einmal bestimmten Einheitsergiebigkeit nichts geändert; ebenfalls spielt die Vergrößerung des Durchflußprofiles bei großen Mächtigkeiten der wasserführenden Schicht keine belangreiche Rolle. Nur der Verkleinerung des Gefälles ist ein großes Gewicht beizulegen, da sein Wert auf Null herabsinken und sogar negativ sein kann.

Sinkt der Wasserspiegel auf seine alte Höhe wieder zurück, dann äußern sich sämtliche Erscheinungen im umgekehrten Sinne; jedoch wird der Zeitverbrauch zur Herstellung des ersten Zustandes, Fig. 15, ein bei weitem bedeutenderer sein, als er es war, um den zweiten, Fig. 16, zu erzeugen. Denn anfänglich beteiligten sich Fluß- und Grundwasser gemeinsam an der Erhöhung des Spiegels im Untergrund, während jetzt nach Eintritt von Niedrigwasser im Fluß dem Grundwasser allein die Aufgabe zufällt, die vorher gefüllten Räume zu entleeren.

Um die wechselnden Spiegelstände der Iser und ihre Einwirkungen auf den Untergrund zu beobachten, wurden die Fluß- und Grundwasserspiegel, letztere jedoch immer je nach ihrer Herstellung in den Bohrungsgruppen laufend, an demselben Tage gemessen. Die Ergebnisse der Spiegelmessungen der Iser sind als Diagramm abhängig von der Zeit auf Blatt 5 aufgetragen. Für die Bohrungsgruppen wurden mit Ausnahme von Gruppe 3—4, wo durch unbefugten Eingriff ein Beobachtungsrohr zerstört wurde, das absolute Gefälle des Grundwassers bestimmt und aus dem bekannten Abstand zweier zusammengehöriger Beobachtungsrohre das spezifische Gefälle abgeleitet. Auf Blatt 6 sind die Ergebnisse mit Angabe der Beobachtungszeit graphisch dargestellt.

Aus dem Spiegelgang der Iser bei Skorkov (Blatt 5) geht hervor, daß nach Eintritt eines starken Hochwassers, verursacht durch die Schneeschmelze im Gebirge am 5. Januar 1902, die Iser mit einer kleinen Unterbrechung am 23. Januar im langsamen stetigen Fallen begriffen war, und vom 6. Februar bis zu Ende der Untersuchung sämtliche Bohrungsgruppen am 22. März um eine mittlere Stromlage, mit nur geringem Ausschlagen nach oben und unten, schwankten. Darum zeigt sich auch, wie aus Blatt 6 hervorgeht, bis zu dieser Zeit in den Spiegel- und Gefällsgängen der Gruppen eine große Gleichmäßigkeit. Durch das am 25. März eintretende Hochwasser vollzog sich ein starker Wechsel in den Gefällsgrößen der Gruppen. Alle weisen bei gleichzeitiger Hebung der Spiegel einen starken Rückgang im Gefälle auf, der sogar bei einigen Gruppen, wie 7—8, 13—14 und

besonders stark in 19—20 einen negativen Wert erreichte und dadurch eine Änderung der Strömungsrichtung landeinwärts bewirkte. Diesem Hochwasser folgte ein zweites vom 15. April, dessen Spiegellage die des vorigen zwar übertraf, aber trotzdem auf die Spiegel des Grundwassers nicht dieselben Einwirkungen hervorbringen konnte. Der Untergrund hatte sich somit noch nicht von den Folgen des ersten Hochwassers erholt; die in ihm aufgespeicherten Wassermengen leisteten der nachkommenden Hochwasserwelle durch ihre Höhenlage einen vermehrten Widerstand. Hierauf trat ein Rückgang des Iserspiegels ein; mit ihm war eine Vermehrung des Gefälles und eine Verminderung der Mächtigkeit der wasserführenden Schicht verbunden. Fast in allen Gruppen nähern sich die Gefällswerte denen vom Tage ihrer Untersuchung und überschreiten sie zum Teil. An den aufeinander folgenden Tagen vom 18. bis 20. Juni wurden sämtliche Grundwasserspiegel nach vorangegangener Prüfung ihrer Echtheit untersucht und ihre absoluten Gefälle festgestellt, ohne jedoch ihre absolute Meereshöhe zu bestimmen, welche darum auch auf Blatt 6 fehlt. Die Untersuchung zeigt überraschend die bedeutenden Gefällsdifferenzen innerhalb 48 Stunden und beweist damit, daß es unmöglich ist, die Erscheinungen im Untergrund analytisch zu beherrschen. Nur eine Summe von Einzelbeobachtungen, die während der Dauer von mindestens einem Jahr gesammelt werden, können derartige Schwankungen in den gefundenen Werten ausgleichen und zu einem brauchbaren Mittelwert für die Berechnung der der Iser zuströmenden Grundwassermenge führen.

Immerhin lassen die Spiegelgänge der Iser sowohl an den Tagen vor der Untersuchung als auch während derselben die Annahme gerechtfertigt erscheinen, daß während der Arbeitsdauer die Verhältnisse im Untergrund mit hoher Wahrscheinlichkeit um einen mittleren Beharrungszustand geschwankt haben und darum auch die gewonnene Gesamtergiebigkeit des Grundwasserstromes im Betrag von 263 Sek.-Ltr. einen mittleren, für spätere Projektarbeiten zugrunde zu legenden Wert besitzt.

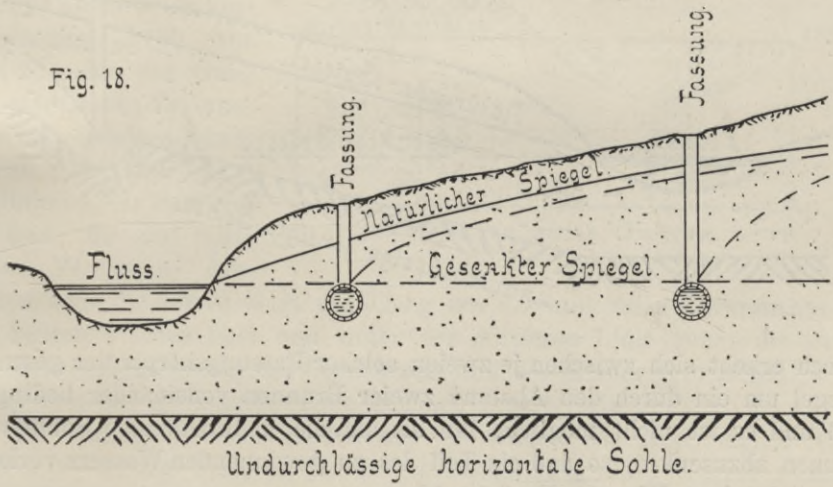
Mit der Aufstellung dieses Schlußsatzes ist der eigentliche Zweck der speziellen hydrologischen Untersuchung für das vorliegende Gelände erreicht und die Verwertung dieses Ergebnisses für die zukünftige Ausgestaltung einer Wassergewinnungsanlage im Isertal würde außerhalb des Rahmens der besonderen hydrologischen Forschung fallen. Sämtliche Beobachtungen, die daraus gezogenen Folgerungen, Schlüsse und aufgemachten Rechnungen gelten für einen nur durch die natürlichen Schwankungen der Iser beeinflußten Grundwasserspiegel.

Wer den Ausführungen bis hierher gefolgt ist und sie ohne weiteres gelten läßt, dürfte es indessen doch als zur Vervollständigung nötig erachten, die Veränderungen im Untergrund durch eine künstliche Entnahme von Grundwasser für Zwecke einer Wasserversorgung erörtert zu sehen. Es seien darum in allgemeinen Umrissen die gegenseitigen Beziehungen und Beeinflussungen der drei maßgebenden Faktoren: **Fluß, Grundwasserstrom und Wasserbedarf** auf das Verhalten des Grundwasserspiegels beleuchtet

und die Ausführungen mögen, soweit es erforderlich erscheint, durch Rechnung unterstützt werden.

Bisher mündete das gesamte im Diluvium fließende Grundwasser unter normalen Zuständen in die das Fassungsgebiet durchziehende Iser. Eine Fassung, der es möglich ist, sämtliches Grundwasser ohne jeglichen Verlust an Menge zu gewinnen, Flußwasser jedoch, das durch den Untergrund in die Fassungskörper gelangen könnte, auszuschließen, wird ihren Zweck am vollkommensten erfüllen. Mit Hilfe eines parallel zum allgemeinen Flußverlauf in dessen unmittelbarer Nachbarschaft befindlichen Fassungszuges, bestehend aus einer Sammelgalerie, könnte dieses Ziel erreicht werden unter der Bedingung, daß der Fassungsspiegel stets in gleicher Höhe wie der benachbarte Flußspiegel gehalten wird. Wegen der Gleichheit der beiden Spiegellagen kann dann eine Bewegung des zwischen beiden Spiegeln befindlichen Wassers weder nach der einen, noch nach der andern Richtung hin erfolgen; dieser Bedingung ist jedoch wegen der unvermeidlichen Spiegelschwankungen des Flusses nicht gänzlich nachzukommen und darum muß der Abstand zwischen Fassung und Fluß ein gewisses Maß betragen.

Fig. 18.



Verläuft die wassertragende, undurchlässige Sohle vom Flußufer ab binnenwärts in horizontaler oder gar fallender Richtung, so kann die Fassung innerhalb dieses Verhaltens jede beliebige, große Entfernung annehmen und der Bedingung gleich hoher Spiegellagen kann selbst bei niedrigsten Flußwasserständen genügt werden. Die Größe der Entfernung kann dann so weit getrieben werden, daß die Spiegelschwankungen des Flusses praktisch ohne jegliche Einwirkung auf die Fassung bleiben. Fig. 18 wird dies verdeutlichen.

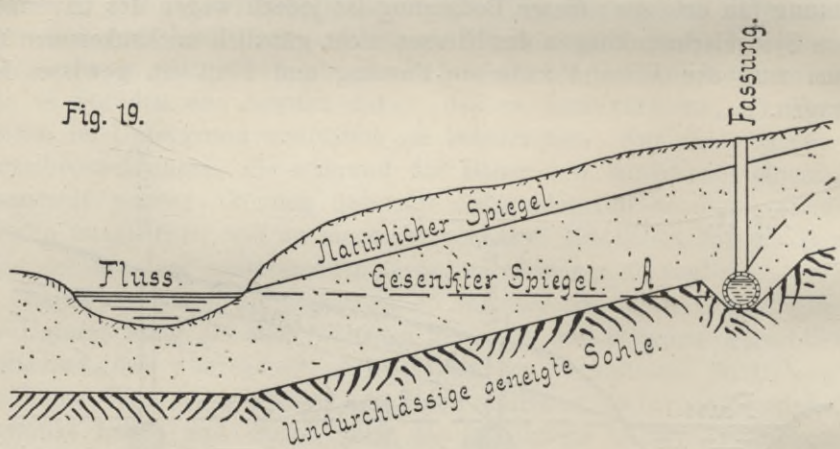
Steigt der Flußspiegel, so bewegt sich das bisher zwischen Fassung und Fluß in Ruhe befindliche Grundwasser binnenwärts und erhöht die Ergiebigkeit der Fassung, solange der Spiegel in ihr ungeändert bleibt.

Ob bei diesem Vorgang Flußwasser auf unterirdischem Weg in die Fassung gelangt oder nicht, hängt neben anderen Vorbedingungen im wesentlichen von der Entfernung der Fassung vom Fluß ab. Jedenfalls ist ohne weiteres klar, daß mit zunehmender Entfernung dieser Fall um so später eintritt.

Hat die undurchlässige Sohle nach dem Fluß zu Gefälle, so hängt es von dessen Größe ab, innerhalb welchen Abstandes vom Fluß der Bedingung gleicher Höhenlage von Fluß- und Fassungsspiegel genügt wird. In Fig. 19 ist dies veranschaulicht.

Rechts vom Punkt *A*, dem Schnittpunkt einer durch den Flußspiegel gelegten Horizontalen mit der geneigten wassertragenden Sohle, kann das gesamte Grundwasser nur durch eine in die undurchlässige Sohle eingebettete Schlitzrohrfassung abgefangen werden. Eine derartige Wasserfassung ist aber in den weitaus meisten Fällen eine der teuersten und man wird sie durch eine Reihenfolge von Schächten oder Rohrbrunnen ersetzen.

Fig. 19.



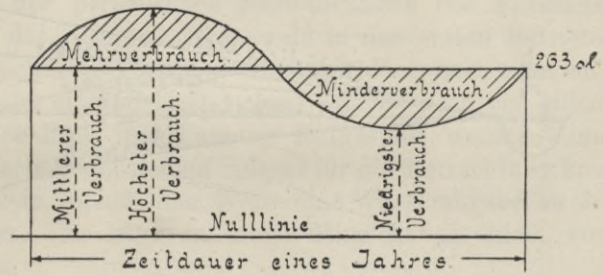
Jedoch erhebt sich zwischen je zweien solcher Fassungskörper der gesenkte Spiegel um ein durch den Abstand zweier Brunnen voneinander bedingtes Maß und es ist nicht möglich, ihn bis auf die undurchlässige Sohle vollkommen abzusenken, so daß ein Teil des zu gewinnenden Wassers verloren geht und seinen Weg im Fluß beendet.

Zur Erhöhung der Wirksamkeit der Fassung und zur Erzielung wirtschaftlich zulässiger Baukosten ist man somit gezwungen, die Fassung mehr an den Fluß heranzuschieben. Zu dieser Anordnung drängt außer diesem Grund auch noch die orographische Gestaltung des Untersuchungsgebietes, wie sie in einem früheren Abschnitt bereits eingehend besprochen worden ist. Die Talsohle ist schmal und wird seitlich von hohen Terrassen eingesäumt, die nördlich und südlich des Untersuchungsfeldes bis an das Flußufer herantreten. Allen diesen Bedingungen, als da sind: Wirtschaftlichkeit der Anlage, Wirksamkeit der Grundwasserfassung und Ausschaltung der schädlichen Einwirkungen des Flusses, soll nun in zweckmäßigster Weise Rechnung getragen werden.

Auf Grund der Untersuchungen und Rechnungen wurde eine mittlere Grundwassermenge von 263 Sek.-Ltr. oder rund 22700 Tages-cbm nachgewiesen; diese Menge soll durch eine Fassung von 6000 m Länge in 280 m Abstand vom Fluß gewonnen werden. Welche Gründe zur Annahme dieser letzten Zahl führten, wird weiter unten rechnerisch ermittelt.

Würde der höchste Tagesverbrauch im Versorgungsgebiet niemals die mittlere Grundwassermenge erreichen, also der höchste Bedarf kleiner als der Zufluß sein, dann müßte der Spiegel in der Fassung stets höher als der benachbarte Flußspiegel liegen und gewisse Mengen Grundwasser müßten zu Zeiten geringen Verbrauches ungenützt ihren Weg im Fluß beenden. Sobald es die allgemeinen hydrologischen Zustände eines Feldes gestatten, wird man die gesamten Anordnungen für Fassung, Hebung und Leitung des Wassers so treffen, daß die mittlere, den Fassungen zuströmende Grundwassermenge den mittleren Tagesverbrauch im Versorgungsgebiet während eines Jahres darstellt. Erfahrungsgemäß beträgt jedoch der höchste Tagesverbrauch das 1,4fache des mittleren, also im vorliegenden Fall unter Anpassung an die obige Voraussetzung 31780 cbm. Fig. 20 möge den Gang des städtischen Verbrauches während eines Jahres veranschaulichen. Zur Nullinie ist eine Parallele gezogen, die den mittleren Verbrauch darstellen soll; die Kurve zeigt den Gang des schwankenden Verbrauches an. Die beiden Flächen über und unter der mittleren Linie geben die Größe des Mehrverbrauches in der Sommerzeit und des Minderverbrauches in der Winterzeit an; sie müssen beide gleichen Inhalts sein.

Fig. 20.

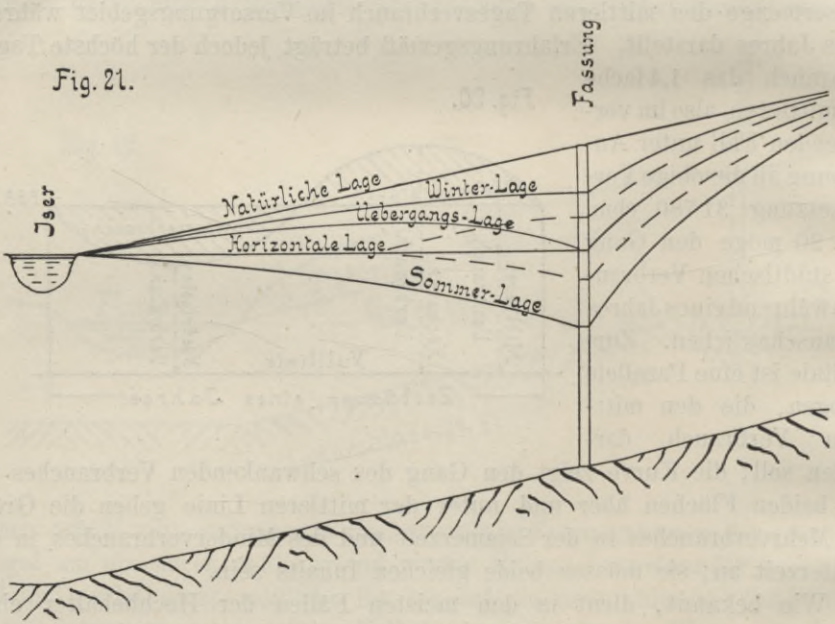


Wie bekannt, dient in den meisten Fällen der Hochbehälter einer Wasserversorgung dazu, die Verbrauchsschwankungen an Wasser während eines Tages auszugleichen. Die Größe des erforderlichen Behälters hängt von der zeitlichen Dauer und der Stärke des Betriebes ab; zu gewissen Zeiten, meist in den Abend- und Nachtstunden, werden in ihm Vorräte angesammelt, um den höchsten Stundenbedarf am Vormittag zu decken. In gleicher Weise könnte man durch einen künstlichen Ausgleichbehälter den Überschuß an Grundwasser in den kalten Monaten aufspeichern, um den dadurch erzielten Vorrat in den warmen wieder zu gewinnen. Bei fortlaufender Entnahme derselben mittleren Menge aus der Fassung würde dann der Bedarf zu jeder Zeit gedeckt sein, ohne den Bezugsort über seine wirkliche Leistungsfähigkeit hinaus zu beanspruchen. Nach den einschlägigen Erhebungen beträgt der Mehr- oder Minderverbrauch ungefähr 15 Proz. der Jahresmenge, im vorliegenden Fall also in runder Summe 1,2 Millionen

Kubikmeter. Die Erbauung eines Behälters von einem solchen Fassungsvermögen dürfte wohl niemand ohne Not vorschlagen und der Gedanke liegt nahe, den Untergrund als natürlichen Ausgleichbehälter heranzuziehen. Zur anschaulichen Erläuterung der Wirkung der wechselnden Beanspruchung der Fassung auf den Grundwasserspiegel möge Fig. 21 dienen, die einen Schnitt senkrecht zur Fluß- und Fassungsrichtung darstellen möge.

In ihr ist der natürliche Grundwasserspiegel vor der Zeit der dauernden Beanspruchung der Fassung eingezeichnet und mit „Natürliche Lage" benannt; er weist fallende Richtung nach dem Flusse zu auf. Zur Gewinnung des Grundwassers muß eine Spiegelsenkung in der Fassung erzeugt werden, von deren Größe ihre Ergiebigkeit abhängt. In den ersten Betriebsjahren trägt sowohl das vom Lande kommende Grundwasser, als auch das zwischen Fluß und Fassung befindliche zur Ergiebigkeit bei; außerdem

Fig. 21.



strömt aber, solange die Aufdeckung der Spiegellagen im Untergrund eine Kulmination zwischen der Iser und der Fassung ergibt, Grundwasser ungenutzt dem Flusse zu und ist dauernd für die Fassung verloren. Dieser Zustand der Grundwasserwelle ist in Fig. 21 mit „Übergangslage" bezeichnet. Will man erzielen, daß in diesen Zeiten des ersten Betriebes das gesamte von den Höhen kommende Grundwasser gewonnen wird, so muß zum mindesten der Spiegel in der Fassung in gleicher Höhe wie der Flußspiegel gehalten werden; liegt er darüber, so geht Grundwasser ungefaßt unter der Fassungsleitung hindurch und beendet seinen Weg im Flusse. Je stärker im Anfang der Spiegel gesenkt wird, wodurch naturgemäß dem Untergrund mehr Wasser entzogen wird, als er an Ersatz empfängt, um so schneller rückt der Kulminationspunkt auf seinem Wege von der Fassung nach dem

Flusse zu und erreicht ihn schließlich. Hält man jedoch von Anfang an die Spiegellagen dauernd gleich, so muß endlich nach mehreren Jahren ein Zustand der Grundwasserwelle eintreten, der in Fig. 21 mit „Horizontale Lage“ bezeichnet ist. In diesen Übergangszeiten nimmt die Fassungsergiebigkeit mehr und mehr ab. Das Grundwasser binnenwärts versorgt die Fassung allerdings dauernd mit der gleichen Menge, jedoch der Zufluß an Grundwasser von der anderen Seite vermindert sich allmählich und wird endlich zu Null. Sämtliche Spiegel zwischen Fluß und Fassung weisen nach Eintritt dieses Zustandes gleiche Höhenlage auf und es findet somit eine Strömung weder nach der einen noch nach der anderen Richtung hin statt. Die Ergiebigkeit der Fassung stützt sich nach Erreichung dieses Endzustandes allein auf die Versorgung vom Lande her. Ihre Leistung muß die gleiche wie die des Grundwasserstromes sein.

Es soll nun die strikte Voraussetzung gelten, daß der mittlere Tagesverbrauch im Jahre der mittleren Grundwassermenge entspricht. Je nach dem Mehr- oder Minderverbrauch zu den entsprechenden Jahreszeiten wird der Fassungsspiegel seine Lage ändern müssen. Es würde zu verwickelt sein, die Einwirkungen der periodischen Schwankungen des Fassungsspiegels auf die Gestalt des Grundwasserspiegels in den ersten Betriebsjahren zu erläutern. Welches aber auch deren Ausschläge nach oben oder unten sein mögen, soviel ist unzweifelhaft sicher: solange noch ein kulminierender Spiegel zwischen Fluß und Fassung festgestellt werden kann, wird niemals der benachbarte Fluß, dessen Spiegel für die Betrachtung konstant angenommen wurde, in irgend einer Weise eine Wasserabgabe an die Fassung bewirken können. Er kann in dieser Hinsicht als nicht vorhanden angesehen werden.

Tritt der mit „Horizontale Lage“ bezeichnete Zustand im Frühjahr, also vor Beginn des Mehrverbrauches, ein, so muß der Fassungsspiegel, um letzteren zu decken, schrittweise unter den Flußspiegel gesenkt werden. Dem bis dahin zwischen Fluß und Fassung in der Richtung auf diese in Ruhe befindlichen Wasser wird nach der Fassung zu ein Gefälle erteilt, wodurch Bewegung eintritt, deren Größe abhängig von dem Maß der Mehrsenkung ist. Deren Wirkung wird sich nicht der gesamten Umgebung sofort mitteilen; der ihr entsprechende Beharrungszustand im Untergrund wird sich um so schneller einstellen, je grobkörniger das wasserführende Material ist; ebenfalls ist davon der bei einer bestimmten Senkung erzielte Mehrzuwachs an Ergiebigkeit abhängig. Einen Zwischenzustand verdeutlicht in Fig. 21 die untere gestrichelte Kurve. Ihr Verlauf beweist, daß noch nicht das gesamte Wasser den Ruhezustand verlassen hat und sich auf dem Wege nach der Fassung zu befindet. Erst die mit „Sommerlage“ bezeichnete Kurve kennzeichnet den Eintritt dieses Zustandes. Sollte die zur Zeit des Mehrverbrauches in der Richtung auf den Fluß zu fortschreitende Entnahmegrenze für Grundwasser ihn gerade erreichen, wenn wiederum die Periode des Minderverbrauches im Versorgungsgebiet ansetzt, wodurch eine Hebung des Fassungsspiegels über den des Flusses bedingt

ist, dann kann der Fluß eine Einwirkung auf die Grundwasserwelle ebenfalls nicht äußern. Trifft diese Voraussetzung jedoch nicht zu, dann stellt der Fluß einer weiteren Ausdehnung der Entnahmegrenze ein Hindernis entgegen; das dem Grundwasser unmittelbar an seinem Ufer erteilte Gefälle überträgt sich auf einen Teil seines Wassers; dieses wird von seiner natürlichen, talab gerichteten Bahn abgelenkt und beginnt, sich auf die Fassung zu zu bewegen. Die Menge des in den Untergrund eintretenden Wassers ist abhängig von dem Eintrittsgefälle, das wiederum durch das Maß der Mehrsenkung in der Fassung bedingt ist.

Würde die Mehrentnahme aus der Fassung dauernd und eine stets gleiche sein, so müßte sich schließlich ein Beharrungszustand einstellen und die Grundwasserspiegel müßten eine konstante Lage annehmen. Dann liefert der vom Lande kommende Grundwasserstrom trotz der vermehrten Senkung nur seine ihm zukommende Menge und den Mehrbedarf an Wasser, das dem Untergrund entzogen wird, muß der Fluß ersetzen. Je länger die zeitliche Dauer der Mehrsenkung ausgedehnt wird, um so mehr schiebt sich das in den Untergrund eingedrungene Iserwasser binnenwärts vor und erfüllt ihn in seiner ganzen durchlässigen Höhe; diese nimmt landein mit wachsendem Gefälle ab und das Iserwasser schreitet um so schneller vorwärts, je stärker dieses Gefälle ist. Eine ausgedehnte Mischung von Fluß- und Grundwasser findet nicht statt; scharf ist die Grenze der beiden verschiedenen Wässer gezogen. Die gesamten ganz bedeutenden Vorräte an echtem Grundwasser im Becken zwischen Fluß und Fassung müssen zunächst vollkommen für die Speisung der Fassung aufgebraucht sein; erst dann, wenn dies geschehen, werden sie durch das Flußwasser ersetzt und dieses muß unmittelbar zur Ergiebigkeit der Fassung beitragen. Die im Untergrund zwischen Fluß und Fassung aufgestapelten Grundwassermengen sind jedoch so groß, daß sie einen zeitlich ausgedehnten Mehrverbrauch an Wasser anstandslos zu decken vermögen, ehe auch nur ein Tropfen Iserwasser in die Fassung gelangen würde. Weiter unten wird die Rechnung den zahlenmäßigen Beweis für diese Behauptung führen.

Bei den wenigen Monaten, die der höhere Bedarf an Wasser andauert, wird der Weg des Iserwassers in Richtung auf die Fassung nur ein kurzer sein können. Um die Herbstzeit wird der Grundwasserspiegel sich einer horizontalen Lage wiederum genähert haben; infolge mangelnden Gefälles hört der weitere Eintritt von Flußwasser in den Untergrund auf; das in ihm befindliche erleidet eine kurze Dauer der Ruhe, bis durch die verminderte Entnahme von Wasser aus der Fassung eine allgemeine Hebung der Grundwasserwelle zuerst in der Fassungsnähe sich bemerkbar macht; hierdurch wird ein Gefälle erzeugt, das sich in der Richtung auf den Fluß fortpflanzt und das Grundwasser in Bewegung versetzt. Das Gefälle erstreckt sich fortschreitend auf den Fluß zu und teilt sich dem eingedrungenen Iserwasser mit; dieses tritt eine rückläufige Bewegung an, die sich um so schneller vollzieht, je größer der Minderverbrauch an Wasser im Versorgungsgebiet ist, und es gelangt schließlich an seinen alten Ausgangs

ort, das Flußbett, zurück. Den letzteren Zustand stellt in Fig. 21 die mit „Winterlage“ bezeichnete Kurve dar, während die obere gestrichelte einen Übergangszustand verdeutlicht. Hat sich die Voraussetzung der Gleichheit zwischen mittlerem Tagesverbrauch im Jahre und mittlerer Grundwassermenge den tatsächlichen Verhältnissen anpassen können, dann wird in dem Augenblick, wo der letzte Tropfen Iserwasser den Untergrund verlassen hat und echtes Grundwasser wiederum in das offene Gewässer eintreten würde, der Zeitpunkt für den Beginn des Mehrverbrauches gekommen sein, also eine horizontale Lage der Grundwasserspiegel sich von neuem eingestellt haben. Das Spiel der Schwankungen im Verbrauch und der dadurch bewirkten Veränderungen im Untergrund kann zum anderenmal beginnen.

Indessen vollziehen sich diese eingehend behandelten Vorgänge nicht mit der geschilderten Regelmäßigkeit; angenommen wurde bei all diesen Betrachtungen eine feste Lage des Flußspiegels; dies ist jedoch nicht zutreffend. Die Iser ist ein Gebirgsstrom von kurzer Länge und einem sehr bedeutenden Gefälle. Hochwässer, hervorgerufen durch Schneeschmelze, starke Regen, treten mit großer Heftigkeit auf, um vielfach nach wenigen Tagen, meist sogar Stunden zu verschwinden. Störend bleiben sie immer für die Beurteilung der Vorgänge im Untergrund; hingegen können sie das oben erläuterte große, allgemeine Bild der Bewegungserscheinungen nicht verwischen.

In den Kreis der Betrachtungen ist jedoch noch die Tatsache zu ziehen, daß die mittlere Ergiebigkeit des Grundwasserstromes von 263 Sek.-Liter ebenfalls Schwankungen nach oben und nach unten unterworfen ist. Jene nach oben begünstigen die Aufsammlung an Vorräten im Untergrund und brauchen füglich nicht weiter kritisch beleuchtet zu werden; nur die Abnahme der mittleren Grundwassermenge ist hier eingehend zu erwägen. Unter sonst gleichen Umständen, d. h. bei Unveränderlichkeit des natürlichen Gefälles und der Durchlässigkeit ist die zeitliche Ergiebigkeit eines Grundwasserstromes abhängig von der Mächtigkeit der wasserführenden Schicht, also von der Höhe der Wassersäule in dem durchlässigen Material. Wird ein Brunnen bis auf die wassertragende Schicht niedergebracht und versiegt er zu gewissen Jahreszeiten, so schließt von vornherein ein solches Verhalten eine weitere Untersuchung des Grundwasserstromes aus. Mangels eigener, zeitlich ausgedehnter Beobachtungen geben vorhandene Brunnen genügenden Aufschluß über die Größe der Schwankungen des Grundwasserstandes, namentlich über dessen tiefste Lage. Die beim Bau der gewöhnlichen Dorf- und Hausbrunnen befolgte Regel ist die: „Die Brunnensohle bringt man nur wenige Dezimeter unter den zeitlich herrschenden Grundwasserstand, so daß die vorhandene Wassertiefe gerade für die geringen Entnahmen genügt. Sinkt der Grundwasserspiegel, so vertieft man ihm folgend die Sohle und darum gibt die Sohle lange im Gebrauch befindlicher Brunnen eine wenig von der Wirklichkeit abweichende Lage des tiefsten Grundwasserstandes an.“ Untersucht man ein Gelände hydrologisch und weist man nach, daß seit einer Reihe von Jahren Brunnen niemals

versiegten oder vertieft wurden, so bezeichnet die zur Zeit der Untersuchung gemessene Höhe des Wasserstandes in den Brunnen das Maß für die unterste Grenze, bis zu der der Grundwasserstand seit Bestehen der Brunnen gesunken sein kann. Man wird nur solche Brunnen auswählen, deren Lage und Umgebung auf eine starke Benutzung schließen läßt und in den meisten Fällen wird es gelingen, einwandfreie Angaben über ihr Verhalten zu bekommen, denen jedoch nur der Wert einer Indizie beizulegen ist.

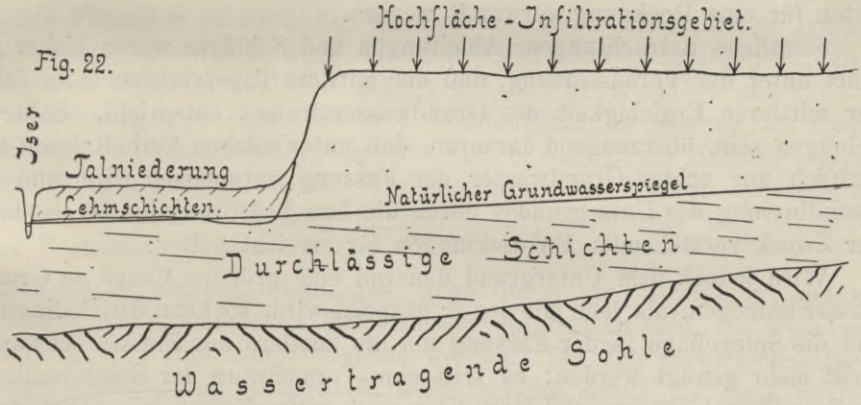
Die Schwankungen des Grundwasserstandes sind nicht wie diejenigen der sichtbaren Gewässer unmittelbar den Einwirkungen der Jahreszeiten unterworfen; im allgemeinen fallen die geringsten Ergiebigkeiten eines Grundwasserstromes zeitlich auch nicht mit dem höchsten Verbrauch an Wasser für ein Versorgungsgebiet zusammen. Um dies genauer zu beweisen, mögen die einschlägigen Faktoren für die Ausbildung von Grundwasserströmen erläutert werden.

Das auf die Erdoberfläche als Tau, Regen oder Schnee fallende Meteorwasser scheidet sich, wenn die Vorbedingungen dazu gegeben sind in zwei Teile; der eine fließt teils oberirdisch sichtbar ab und legt vorwiegend einen geneigten Weg zurück, teils bleibt er in der Oberflächenbedeckung, den Gräsern, Bäumen und dergl. hängen und seine Weglänge wird Null; der zweite sickert in den Untergrund ein, und seine Bahn ist nahezu senkrecht. Übergänge vom ersten und zweiten zum dritten Ablagerungszustand stellen sich sofort ein; aus allen drei Zuständen geht ein Teil des Wassers auf dem Wege der Verdampfung unmittelbar wieder in die Atmosphäre zurück.

Der sichtbar abfließende Teil hängt ab von dem Relief der Oberfläche, der Durchlässigkeit derselben und des Untergrundes, sowie von der Form und Verteilung der Meteorwässer; er kann auf räumlich ausgedehnten Flächen Null oder, abgesehen von der Verdampfung, beinahe Eins werden. Für das erstgenannte Verhalten bildet die fast horizontale Ebene, die sich über der Terrasse der Iserniederung ausdehnt, einen schönen Beleg. Hier vereinigt sich geringe den Abfluß verzögernde Neigung der Oberfläche mit hoher Durchlässigkeit des den Untergrund bildenden Diluvialschotters. Die Größe der Versickerungsmenge ist gegensinnig durch dieselben Ursachen, wie die der Abflußmenge, bedingt. Eine zeitlich mehr gleichmäßige Verteilung der Regenmenge wird viel Grund- und wenig Oberflächen- und Verdampfungswasser erzeugen, während dieselbe Regenmenge in einzelnen starken Ergüssen vereinigt die Anteilswerte vollständig verschiebt. Ferner werden große, langsam schmelzende Schneemengen relativ mehr Grundwasser bilden, als dieselbe Menge in Form eines starken Regens.

Das Versickerungswasser nimmt in den meisten Fällen zunächst die Form des hängenden Grundwassers an; begegnet solches auf seinem nach abwärts gerichteten Weg einer undurchlässigen Schicht, so geht das Grundwasser aus der hängenden in die geschlossene Form über. Diese Schicht wird zur wassertragenden und auf ihr und entsprechend ihrem Allgemeingefälle setzt dann das Wasser als Grundwasserstrom seinen Weg fort, auf

dem es fortschreitend eine dauernde Vermehrung seiner Ergiebigkeit durch weitere Einsickerungen erhält. Die Zeitdauer für den Übergang von Meteorwasser zu geschlossenem Grundwasser hängt von vielen Einflüssen ab. Im allgemeinen kann man sagen, daß sie abhängig ist von der Beschaffenheit, dem Aufbau, der Art und der Höhe der durchsickerten Schichten. So viel steht fest, daß ein Parallelismus zwischen Regenmenge und Grundwasserstand nicht immer zu erkennen ist. Die Schwankungsperiode ausgedehnter Grundwasserströme vollzieht sich nicht wie die der sichtbaren Gewässer gleichsinnig mit den Jahren; eine Folge wasserarmer und wasserreicher Jahre ist für sie bestimmend. Meist wird die Zeitdauer von Ursache zu Wirkung weitaus unterschätzt und Jahresfolgen gehören dazu, eine Periodizität erkennbar zu machen. Je kleiner indessen die Schwankungen des Grundwasserspiegels sind, um so sicherer und zuverlässiger wird der Wasserbezug aus dem Untergrunde sein.



In Fig. 22 ist ein Schnitt quer durch die Iserniederung und die anschließende Hochfläche gelegt. Auf der wassertragenden, undurchlässigen Sohle, bestehend aus turonen, festgelagerten Kalkmergeln, bauen sich wasserführende Schichten, Kiese, Grande und Sande auf, die unterhalb der Terrasse von einer 1 bis 2 m starken Schicht Lehmes überlagert sind; frei von dieser Bedeckung ist das hochgelegene Gelände und unmittelbar stehen die Sande zutage. Als fast undurchlässig für das Eindringen von Meteorwasser kann man die Lehme betrachten und den Zuwachs an Ergiebigkeit, den das Grundwasser, die Niederung durchquerend, durch Infiltrationswasser empfängt, kann man dort praktisch als Null ansehen. In Fig. 22 ist dies durch das Fehlen der die Infiltration andeutenden Pfeile kenntlich gemacht. Die Hochfläche zeichnet sich durch einen vollkommenen Mangel von sichtbaren Gewässern oder den Spuren solcher aus; die bedeutende Erhebung leicht durchlässiger Schichten über dem Grundwasserspiegel bietet eine vorzügliche Gelegenheit für die Ansammlung von Sickerwasser und eine nicht hoch genug anzuschlagende Gewähr für eine dauernde, fast gleichmäßige Speisung des Grundwasserstromes und somit eine große

Sicherheit für einen unveränderten Wasserbezug. Die Hebung des Grundwasserspiegels durch die Versickerungen ist gleichmäßig im ganzen wirksamen Infiltrationsgebiet. Während einer mehrjährigen Beobachtungsdauer konnten an Spiegelaufdeckungen, die frei von Einwirkungen eines benachbarten Flusses und einer Entnahme waren, Schwankungen von praktischer Bedeutung überhaupt nicht wahrgenommen werden; ein solches Verhalten läßt auf eine große Regelmäßigkeit der Versorgung des Grundwassers mit Infiltrationswasser schließen. Die Menge des am Fuße der Terrasse (siehe Fig. 22) in die Niederung fließenden Grundwassers kann demnach ohne Rücksicht auf die klimatischen Änderungen der Jahreszeiten konstant angenommen werden, und sie wird dauernd zur Versorgung des Entnahmegebietes beitragen.

Auf Grund der oben angegebenen Beschreibung beim Bau von Dorfbrunnen, wurde der überhaupt möglich tiefste Stand des Grundwasserspiegels ermittelt; das Ergebnis fiel sehr günstig aus und es wird weiter unten für eine Rechnung verwandt werden.

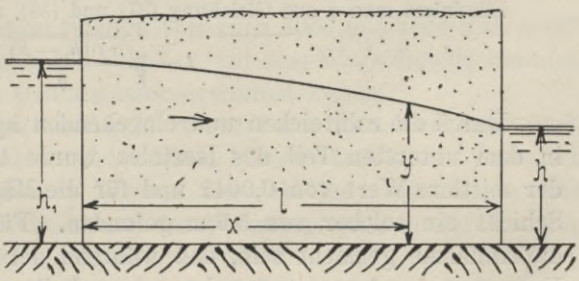
Sämtliche Betrachtungen, Ableitungen und Schlüsse waren bisher geführt unter der Voraussetzung, daß der mittlere Tagesverbrauch im Jahre der mittleren Ergiebigkeit des Grundwasserstromes entspricht. Sollte es gelungen sein, überzeugend darzutun, daß unter solchen Verhältnissen tatsächlich nur echtes Grundwasser der Fassung entnommen wird und die Beeinflussung des Untergrundes durch die Iser bedeutungslos ist, so kann der Zweck vorstehender Entwicklungen für erreicht gelten.

Wird jedoch dem Untergrund dauernd eine größere Menge an Grundwasser entzogen, als jene mit der er gespeist wird, so kann der Bedingung, daß die Spiegellage in der Fassung um die mittlere des Flusses schwankt, nicht mehr genügt werden; es tritt eine Vermehrung der Spiegelsenkung im Entnahmeobjekt ein und mag diese auch geringfügig sein, endlich tritt, wenn auch erst nach mehreren Jahren der Zustand ein, daß der Fluß sich dauernd an der Ergiebigkeit der Fassung beteiligt und somit eine Erschöpfung des Grundwasserbeckens verhindert. Eine tiefere Lage des Fassungsspiegels unter dem benachbarten Iserspiegel auch während mehrerer Monate dagegen ist für sich allein noch kein sicheres Anzeichen, daß wirklich Iserwasser gewonnen wird; einen Aufschluß darüber kann nur eine dauernde und regelmäßige Beobachtung des Grundwasserspiegels zwischen Fluß und Fassung geben. Wird während des Verlaufes eines Jahres festgestellt, daß in der Zeit vom höchsten zum niedrigsten Verbrauch die Grundwasserspiegel steigendes Verhalten aufweisen, so daß sie schließlich allenthalben zwischen Fluß und Fassung gleichsinnige Gefällsrichtung nach dem Flusse zu besitzen, dann besteht die absolute Sicherheit, den vorher in der Sommerzeit geschaffenen Hohlraum im Untergrund beseitigt, und das gesamte Iserwasser aus dem Untergrund verdrängt zu haben. In diesem Falle hat der mittlere Verbrauch die mittlere Grundwassermenge unterschritten. Setzt dieses Verhalten im Jahre einmal aus, dann ist dies erst ein Beweis, daß für die Zeitdauer eines Jahres der Untergrund über seine

normale mittlere Leistung hinaus beansprucht wurde, jedoch braucht deshalb noch nicht Flußwasser in die Fassung eingedrungen zu sein. Immerhin ist die Gefahr groß, daß dieser Zustand, wenn die maßgebenden Bedingungen hierzu die gleichen bleiben, in absehbarer Zeit eintreten muß; er verzögert sich, je größer die zur Verfügung stehenden fluktuierenden Grundwassermengen sind und je kleiner der Unterschied zwischen Verbrauchsmenge und Grundwasserergiebigkeit ist. Soll auch fernerhin die absolute Gewißheit, nur echtes Grundwasser zu gewinnen, aufrecht erhalten werden können, dann mahnt die Vorsicht gebieterisch, sofort zu einer Entlastung der Beanspruchung der Fassungskörper überzugehen. Leider wird dies in den meisten Fällen nicht ohne weiteres möglich sein, da andere Wasserbezugsorte für eine sofortige Ausnutzung nicht zur Verfügung stehen, und da meist der augenblickliche Zwang, genügend Wasser zu schaffen, stärker wirkt als die Rücksicht auf Gefahren in der Zukunft. Ob sich gegen die Art der Gewinnung solchen Wassers, das auf seinem Weg eine durchgreifende Filtration erleidet, für die Zwecke einer einwandfreien Trinkwasserversorgung etwas einwenden läßt, soll hier nicht entschieden werden; ich verweise dieserhalb auf eine Schrift von A. Thiem, „Über die künstliche Erzeugung von Grundwasser“, veröffentlicht im Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1898. Darin wird an der Hand mehrerer Untersuchungen gezeigt, welche Veränderungen das Wasser auf seinem Wege vom Flusse zur Fassung in thermischer, chemischer und physikalischer Beziehung erleidet.

Den vorstehenden Anführungen möge durch eine Rechnung, deren Grundlagen den tatsächlichen Verhältnissen entnommen sind, ein weiteres Gewicht für ihre Richtigkeit gegeben werden. Bei den verwickelten Bewegungsvorgängen im Untergrund, hervorgerufen durch die stets wechselnde Beanspruchung der Fassung, müssen Annahmen gemacht werden, die sich auf Zustände der Beharrung beziehen und die analytisch nicht zu beherrschenden des Überganges ausschließen.

Fig. 23.



In Fig. 23 ist ein Filter dargestellt, das auf einer horizontalen undurchlässigen Sohle aufgelagert ist und das von Flußwasser in der Richtung von links nach rechts durchströmt werde und seinen Weg in einer Fassung beenden möge.

Es bezeichnen in Sekunden und Metern:

q die Durchflußmenge auf die Breite Eins, senkrecht zur Bildfläche gemessen, in Kubikmeter,

l die Weglänge des Wassers in Meter,

t die Zeit für den Durchlauf dieser Länge in Sekunden,

p das Porenvolumen in der Kubikeinheit des Filters,

v die Wassergeschwindigkeiten im Porenvolumen in Metersekunden,
h_1 und h die Wasserstände links und rechts vom Filter in Meter,
ε die Einheitsergiebigkeit, deren Bedeutung auf S. 6 erläutert wurde,
x und y Koordinaten.

Gemäß den fundamentalen Voraussetzungen, wie sie am Ende des Abschnittes III gemacht wurden, gilt nach dem Darcyschen Gesetz:

$$q = \varepsilon y \frac{-dy}{dx}; \quad q\,dx = -\varepsilon y\,dy; \quad q \int_0^l dx = -\varepsilon \int_{h_1}^{h} y\,dy \quad \ldots\ldots \quad (31)$$

$$q\,l = \varepsilon \frac{h_1^2 - h^2}{2}; \quad q = \frac{\varepsilon\,(h_1^2 - h^2)}{2\,l} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (32)$$

Die Integration der Gleichung zwischen den Grenzen 0 bis x und h_1 bis y liefert:

$$q\,x = \varepsilon \frac{h_1^2 - y^2}{2}; \quad y = \sqrt{h_1^2 - \frac{2qx}{\varepsilon}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (33)$$

Es ist ferner:

$$v = \frac{q}{p\,y} = \frac{dx}{dt}; \quad dt = \frac{y\,dx\,p}{q} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (34)$$

Wird der Wert von y aus Gleichung (33) eingesetzt, so kommt:

$$\frac{q\,dt}{p} = \sqrt{h_1^2 - \frac{2qx}{\varepsilon}}\,dx \quad \ldots\ldots\ldots \quad (35)$$

Die Integration von Gleichung (35) ergibt:

$$\frac{t\,q}{p} = \frac{\varepsilon}{3q}\left(h_1^3 - \sqrt{\left(h_1^2 - \frac{2ql}{\varepsilon}\right)^3}\right).$$

Setzt man hierin für q den Wert aus Gleichung (32) ein, so findet sich

$$l = \frac{h_1^2 - h^2}{2}\sqrt{\frac{3\,\varepsilon\,t}{p\,(h_1^3 - h^3)}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (36)$$

Diese Betrachtung gilt für freie Spiegel des Wassers im Untergrund; für artesisch gespannte Wässer, deren Bewegung gleichsam wie in einer Röhre erfolgt, tritt in den obigen Gleichungen (31) und (34) für den veränderlichen Wert von y der konstante von m ein und man erhält:

$$q = \varepsilon m \frac{-dy}{dx}; \quad q\,dx = -\varepsilon m\,dy; \quad q = \frac{\varepsilon m\,(h_1 - h)}{l} \quad \ldots\ldots \quad (37)$$

ferner

$$v = \frac{q}{p\,m} = \frac{dx}{dt}; \quad t = \frac{p\,m\,l}{q} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (38)$$

Eliminiert man q aus Gleichung (37) und (38), so folgt

$$l = \sqrt{\frac{\varepsilon\,t\,(h_1 - h)}{p}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (39)$$

Durch die zahlreichen und eingehenden hydrologischen Untersuchungen in dem untersten Teil des Isertales wurde bei den freien Spiegeln für ε der mittlere Wert von 0,0042 und für die Mächtigkeit der wasserführenden Schicht ein solcher von 5,6 m gefunden. Für die weitere Rechnung soll die Annahme gemacht sein, daß während der Dauer von vier Monaten der Fassungsspiegel ununterbrochen einen halben Meter tiefer als der des benachbarten Flusses liege; ferner soll das Porenvolumen $p = 0{,}25$ gesetzt sein. Wie groß muß mindestens die Länge l sein, damit innerhalb genannter Zeit das Flußwasser die Fassung nicht erreiche? Man findet:

$$l = \frac{5{,}6^2 - 5{,}1^2}{2} \sqrt{\frac{3 \,.\, 0{,}0042 \,.\, 4 \,.\, 30 \,.\, 86400}{0{,}25 \,.\, (5{,}6^3 - 5{,}1^3)}} = 291{,}6 \text{ m.}$$

Bei den gespannten Spiegeln hat sich für ε der mittlere Wert von 0,0035 ergeben.

Unter Benutzung der Gleichung (39) kommt für

$$l = \sqrt{\frac{0{,}0035 \,.\, 4 \,.\, 30 \,.\, 86400 \,.\, 0{,}5}{0{,}25}} = 270{,}7 \text{ m.}$$

Eine Prüfung der Gleichung (36) würde die Zulässigkeit der Benutzung der Formel (39) auch für freie Spiegel ergeben, solange der Unterschied zwischen h_1 und h, also die Größe der Absenkung nur klein ist im Verhältnis zur Mächtigkeit der wasserführenden Schicht.

Wie die Spiegelgänge der Iser auf Blatt 5 lehren, dauern die Anschwellungen, hervorgerufen durch Hochwässer, stets nur eine kurze Reihe von Tagen, und darum liegt in dieser Annahme von vier Monaten eine überschüssige Sicherheit. Wenn auf dem untersuchten Gebiet als Mindestmaß des Abstandes der Fassung vom Fluß 280 m genommen wurde und an solchen Stellen, wo die Geländebeschaffenheit die Einhaltung dieses Maßes nicht zuließ, Fassungskörper überhaupt nicht angeordnet wurden, so dürfte allen Forderungen, nur tatsächlich Grundwasser zu gewinnen, genügt sein.

Sollte übrigens die angenommene Zeitdauer wirklich überschritten werden und Flußwasser in die Fassung eindringen, so würde sich die dadurch gewonnene zusätzliche Menge aus Gleichung (32) und (37) ohne weiteres bestimmen lassen. Nach Einsetzung der Zahlenwerte kommt aus (32):

$$q = \frac{0{,}0042\,(5{,}6^2 - 5{,}1^2)}{2 \,.\, 280} = 0{,}000040 \text{ scbm.}$$

Gleichung (37) ergibt, da m die mittlere Mächtigkeit der wasserführenden Schicht = 5,2 m ist:

$$q = \frac{0{,}0035 \,.\, 5{,}2 \,.\, 0{,}5}{280} = 0{,}000033 \text{ scbm.}$$

Bei einer nutzbaren Fassungslänge von rund 6000 m würde sich somit gemäß der Rechnung 240 bezw. 198 Sek.-Ltr. auf dem Wege der sogenannten künstlichen Erzeugung von Grundwasser gewinnen lassen.

Alle diese Betrachtungen sind geführt unter der Annahme einer horizontalen undurchlässigen Sohle; steigt diese binnenwärts an, so behalten trotzdem die für die artesischen Wässer entwickelten Gleichungen ihre Gültigkeit bei, solange die Absenkung des Wasserspiegels in der Fassung nicht bis unter die Deckschichten getrieben wird.

Für die Grundwässer mit freiem Spiegel lehrt eine einfache Überlegung, daß bei geneigter Sohle und unter Beibehaltung der oben angenommenen Zustände das Wasser auf seinem Wege vom Fluß zur Fassung je weiter fortschreitend einen um so geringeren durchlassenden Querschnitt

antrifft, als es bei horizontaler Sohle der Fall ist. Da das gesamte verbrauchte Gefälle nicht größer werden kann, so muß notwendigerweise die vom Fluß in die Fassung abgegebene Wassermenge q kleiner werden.

Auf eine ähnliche Weise zu einer Betrachtung zu gelangen über das Verhalten der Zeitdauer t für ein Wasserteilchen auf seinem Wege vom Fluß zur Fassung bei ansteigender undurchlässiger Sohle, um daraus die Größe l abzuleiten, ist nicht ohne weiteres möglich. Rechnerisch wäre für diesen Fall die Gleichung der Absenkungskurve, in entsprechender Weise wie oben für eine wagerechte Sohle, zu ermitteln und mit ihr diejenige für die Zeit t zu gewinnen.

Gemäß den Untersuchungen beträgt das mittlere spezifische Gefälle des freien Grundwasserspiegels 0,00173; da die undurchlässige Sohle diesem parallel sein soll, so beträgt auf eine Entfernung von 280 m die Höhe der Steigung 0,48 m.

Bei einer mittleren Mächtigkeit der wasserführenden Schicht im Betrage von 5,6 m erscheint das Maß von kaum einem halben Meter nicht bedeutend genug, um eine nennenswerte Änderung von t, wie es sich für die Voraussetzung einer wagerechten, undurchlässigen Sohle ergeben hat, hervorzubringen. Überdies ist die Annahme einer Zeitdauer von vier Monaten, wie schon bewiesen, zu hoch gegriffen und würde eine wesentliche Erniedrigung vertragen.

Außerdem ist bei diesen Ausführungen darauf nicht Bedacht genommen, daß das Flußwasser nicht auf dem kürzesten Wege der Fassung zuströmt. Herrscht nämlich dauernd eine horizontale Lage des Grundwasserspiegels, wie sie in einem Schnitt senkrecht zur herrschenden Fluß- und Fassungsrichtung zum Ausdruck kommt, so beweist dieses nur, daß eine Wasserbewegung in der Bildfläche des dargestellten Schnittes nicht stattfindet; jedoch besteht eine solche senkrecht auf sie zu, und zwar bewegt sich das Grundwasser mit einem Gefälle talabwärts, das dem des Flußspiegels entspricht. Durch eine Spiegelsenkung in der Fassung wird eine Bewegung nach ihr hin erzeugt und beide Geschwindigkeiten vereinigen sich. Das Wasser des Untergrundes tritt also in einem mehr oder minder schiefen Winkel in die Fassung ein, der mit einer Zunahme der Senkung sich mehr und mehr einem rechten nähert.

Angenommen, es sei bei einem halben Meter Tiefersenkung unter dem Flußspiegel ein Beharrungszustand eingetreten und Flußwasser beginne sich in den Untergrund zu ergießen, so würde die gesamte Menge des für diesen Fall zwischen beiden Spiegeln liegenden Grundwassers unter Verwertung der früher genannten Zahlengrößen betragen:

$$6000 . 5{,}60 . 280 . 0{,}25 \cong 2{,}4 \text{ Millionen Kubikmeter.}$$

Von dieser Zahl wäre allerdings der unbedeutende Betrag des durch die Senkung im Untergrund erzeugten Depressionsvolumens abzuziehen, doch ist dies praktisch belanglos. Da, wie schon angegeben, der Mehrverbrauch im Sommer 1,2 Millionen Kubikmeter beträgt, so dürfte wohl jeder überzeugt sein, daß nicht ein Tropfen Iserwasser die Fassung er-

reichen wird. Das natürlich filtrierte Iserwasser nähert sich bis auf ungefähr die Hälfte der Fluß und Fassung trennenden Entfernung und tritt dann eine rückläufige Bewegung nach dem Fluß zu an.

Des weiteren sei noch in Kürze auf die natürlichen Schwankungen des Grundwasserspiegels eingegangen.

Die Messungen gewisser ausgewählter Dorfbrunnen auf dem Untersuchungsfeld lehrten, daß ihre Sohlen mit geringfügigen Unterschieden im Mittel nur 0,4 m tiefer als der Wasserspiegel in ihnen lagen. Es kann demnach nach dem Gesagten zur Zeit des tiefsten Grundwasserstandes höchstens eine Verminderung der mittleren Mächtigkeit der wasserführenden Schicht von 5,6 auf 5,2 m eingetreten sein und mit Anwendung dieses Ergebnisses würde ein größter, nachweisbarer Rückgang der mittleren Ergiebigkeit von 263 Sek.-Ltr. auf 244 Sek.-Ltr. festzustellen sein. Dies würde in einem ganzen Jahr einem Ausfall von

$$(0{,}263 - 0{,}244) \,.\, 86400 \,.\, 365 = 0{,}6 \text{ Millionen Kubikmeter}$$

echten Grundwassers gleichzusetzen sein.

Nach eingetretenem Beharrungszustand kann nur die zwischen Fluß und Fassung aufgespeicherte Grundwassermenge von 2,4 Millionen Kubikmeter als dem Ausgleich dienend angesehen werden. Ein Viertel dieser Summe beträgt die obige Fehlmenge an Grundwasser und zwei weitere Viertel, 1,2 Millionen Kubikmeter, werden für den Ausgleich der Verbrauchsschwankungen im Versorgungsgebiet benötigt. Auf Grund dieser Werte zeigt eine einfache Überlegung, daß selbst unter Voraussetzung der ungünstigsten Zustände, erst nach Verlauf von zwei Jahren Iserwasser die Fassung erreichen würde. Ob man solch lange andauernde, trockene Witterungsverhältnisse annehmen kann, die für eine Dauer von mindestens zwei Jahren die tiefsten Grundwasserstände hervorrufen, mag dahingestellt sein. Durch die bei der Messung der Brunnen eingezogenen Erkundigungen ist nachgewiesen, daß dieser Fall, soweit menschliche Erfahrungen reichen, noch nie eingetreten ist.

Die Art der Fassung soll im allgemeinen in einer im Fassungszug liegenden Reihenfolge von Rohrbrunnen mit einem gegenseitigen Abstand von etwa 20 bis 60 m bestehen. Durch Einschaltung von Beobachtungsrohren zwischen Fassung und Fluß soll es beim späteren, dauernden Betrieb möglich gemacht werden, die hydraulischen Verhältnisse im Gebiet jederzeit prüfen zu können, um Überbeanspruchungen in der Entnahme von Grundwasser vorzubeugen. In welcher Weise es gelingt, die Spiegel im Brunnen unabhängig zu machen von der Lage der Drucklinie, die sich in der die Brunnen verbindenden Heberleitung einstellt, ferner mit welchen Mitteln bei Betriebsstillstand eine Versorgung mit Wasser der tiefer gelegenen Brunnen von den höher liegenden unmöglich gemacht wird, um eine Überschwemmung des Untergrundes zu vermeiden, soll hier nicht erörtert werden, da die Beantwortung dieser Fragen nur von rein konstruktivem Interesse ist und außerhalb des Rahmens dieser Arbeit fallen würde.

Beilage 1.

Schichtenfolgen der Bohrungen

mit hydrologischen und anderen Angaben.

Bohrloch Nr. 1, nördlich von Káraný,

ausgeführt in der Zeit vom 15. Februar bis 18. Februar 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	172,34		0,00	
1		0,20		Mutterboden.
	172,14		0,20	
2		0,80		Feiner Kies mit lehmigem Mittelsand.
	171,34		1,00	
3		2,00		Humus.
	169,34		3,00	
4		5,50		Feiner Kies mit wenig Mittelsand und einzelnen groben Kieseln.
	163,84		8,50	
5		folgt		Gelbgrauer Kalkmergel.
	163,34		(9,00)	

Lage des natürlichen Spiegels: 0,80 m unter Flur; nach Schicht 3: 0,55 m unter Flur.
„ „ Filterkorbes: in Schicht 4; Filterkorbunterkante 8,30 m unter Flur.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 10 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach $1^3/_4$ Stunden ein. Aus den letzten drei Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{5,58}{1,59} = 3,51 \frac{sl}{m}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte 9,7° deutsch. Chlor: 12,6 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 9,0° C. bei einer Temperatur der Luft von — 0,4° C.

Bohrloch Nr. 3, nördlich von Káraný,

ausgeführt in der Zeit vom 18. Februar bis 20. Februar 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	172,41		0,00	
1		0,35		Mutterboden.
	172,06		0,35	
2		0,55		Brauner Lehm, kalkhaltig.
	171,51		0,90	
3		1,10		Grauer Lehm.
	170,41		2,00	
4		5,90		Mittel- bis grober Kies mit wenig grobem Sand.
	164,51		7,90	
5		folgt		Grauer Kalkmergel.
	164,01		(8,40)	

Lage des natürlichen Spiegels: 1,20 m unter Flur.
„ „ Filterkorbes: in Schicht 4.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 10 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach $1^1/_2$ Stunden ein. Aus den letzten drei Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{4,50}{2,84} = 1,58 \frac{sl}{m}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte: 9,8° deutsch. Chlor: 12,6 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 9,2° C. bei einer Temperatur der Luft von 0,3° C.

Bohrloch Nr. 5, nördlich von Káraný,

ausgeführt in der Zeit vom 20. Februar bis 21. Februar 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	173,70		0,00	
1		0,45		Mutterboden.
	173,25		0,45	
2		1,10		Grauer Lehm, sandig.
	172,15		1,55	
3		4,85		Mittelkies mit Mittel- bis grobem Sand.
	167,30		6,40	
4		0,70		Triebsand, stark kalkhaltig.
	166,60		7,10	
5		1,00		Grober Kies mit wenig feinem bis Mittelsand.
	165,60		8,10	
6		folgt		Grauer Kalkmergel.
	165,10		(8,60)	

Lage des natürlichen Spiegels: 2,05 m unter Flur.

„ „ Filterkorbes: in Schicht 3, 4 und 5.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 9 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach $1^1/_2$ Stunden ein. Aus den letzten sechs Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{4,25}{2,23} = 1,91 \frac{sl}{m}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte: 12,6° deutsch. Chlor: 7,7 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 8,3° C. bei einer Temperatur der Luft von 3,0° C.

Bohrloch Nr. 7, südöstlich von der Eisenbahnbrücke über die Iser bei Laubendorf (Otrádovice),

ausgeführt in der Zeit vom 20. Februar bis 22. Februar 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	174,02		0,00	
1		0,40		Mutterboden.
	173,62		0,40	
2		0,70		Brauner Lehm.
	172,92		1,10	
3		5,90		Mittel- bis grober Sand, stark grandig, kalkhaltig.
	167,02		7,00	
4		folgt		Grauer Kalkmergel.
	166,82		(7,20)	

Lage des natürlichen Spiegels: 1,10 m unter Flur, steigt auf 0,95 m unter Flur.

„ „ Filterkorbes: in Schicht 3.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 10 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach $1^1/_2$ Stunden ein. Aus den letzten drei Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{5,65}{1,23} = 4,59 \frac{sl}{m}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte: 13,0° deutsch. Chlor: 10,5 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 8,9° C. bei einer Temperatur der Luft von 0,1° C.

Bohrloch Nr. 9, östlich von der Eisenbahnbrücke über die Iser bei Laubendorf (Otrádovice),

ausgeführt in der Zeit vom 21. Februar bis 25. Februar 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	174,49		0,00	
1		0,40		Mutterboden.
	174,09		0,40	
2		0,70		Brauner Lehm.
	173,39		1,10	
3		1,10		Grauer Lehm.
	172,29		2,20	
4		1,15		Feiner Kies mit Sand.
	171,14		3,35	
5		2,00		Mittelsand grau, stark grandig.
	169,14		5,35	
6		0,65		Grober Kies.
	168,49		6,00	
7		folgt		Grauer Kalkmergel.
	168,34		(6,15)	

Lage des natürlichen Spiegels: 1,62 m unter Flur, steigt in Schicht 3 auf 1,50 m unter Flur.
„ „ Filterkorbes: in Schicht 4, 5 und 6.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 10 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach $1^1/_2$ Stunden ein. Aus den letzten drei Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{4,75}{2,75} = 1,73 \frac{sl}{m}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte: 12,8° deutsch. Chlor: 9,8 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 9,0° C. bei einer Temperatur der Luft von 4,3° C.

Bohrloch Nr. 11, südlich von Sojovice,

ausgeführt in der Zeit vom 24. Februar bis 26. Februar 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	175,37		0,00	
1		0,40		Mutterboden.
	174,97		0,40	
2		0,90		Brauner Lehm.
	174,07		1,30	
3		3,80		Mittel- bis grober Kies mit wenig grobem, schwach kalkhaltigem Sand.
	170,27		5,10	
4		2,70		Faustgroßer Kies.
	167,57		7,80	
5		folgt		Gelbgrauer Kalkmergel.
	167,32		(8,05)	

Lage des natürlichen Spiegels: 1,60 m unter Flur.
„ „ Filterkorbes: in Schicht 3 und 4.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 10 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach $1^1/_2$ Stunden ein. Aus den letzten drei Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{5,63}{1,12} = 5,03 \frac{sl}{m}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte: 10,2° deutsch. Chlor: 7,7 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 9,2° C. bei einer Temperatur der Luft von ca. 8,0° C.

Bohrloch Nr. 13, südlich von Sojovice,

ausgeführt in der Zeit vom 26. Februar bis 27. Februar 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	176,64		0,00	
1		0,30		Mutterboden.
	176,34		0,30	
2		0,70		Brauner Lehm.
	175,64		1,00	
3		6,73		Mittel- bis grober Sand mit feinem Kies.
	168,91		7,73	
4		folgt		Kalkmergel.
	168,71		(7,93)	

Lage des natürlichen Spiegels; 2,70 m unter Flur.

„ „ Filterkorbes: in Schicht 3; Filterkorbunterkante 6,90 m unter Flur.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 10 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach $1^1/_2$ Stunden ein. Aus den letzten drei Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{4,90}{1,11} = 4,41 \frac{\text{sl}}{\text{m}}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte 11,8° deutsch. Chlor: 9,1 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 9,0° C. bei einer Temperatur der Luft von 2,4° C.

Bohrloch Nr. 15, nördlich von Sojovice,

ausgeführt in der Zeit vom 28. Februar bis 1. März 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	177,35		0,00	
1		0,30		Mutterboden.
	177,05		0,30	
2		4,40		Grober Sand mit feinem bis Mittelkies, schwach kalkhaltig.
	172,65		4,70	
3		0,80		Feiner bis Mittelsand, stark grandig, kalkhaltig.
	171,85		5,50	
4		3,50		Grober Kies.
	168,35		(9,00)	
5		folgt		Kalkmergel.

Lage des natürlichen Spiegels: 2,95 m unter Flur.

„ „ Filterkorbes: in Schicht 3 und 4; Filterkorbunterkante 8,00 m unter Flur.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 10 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach 2 Stunden ein. Aus den letzten drei Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{5,50}{0,56} = 9,82 \frac{\text{sl}}{\text{m}}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte: 11,6° deutsch. Chlor: 11,9 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 7,8° C. bei einer Temperatur der Luft von 5,5° C.

Bohrloch Nr. 17, östlich von Skorkov,

ausgeführt in der Zeit vom 1. März bis 3. März 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	178,24		0,00	
1		0,60		Mutterboden.
	177,64		0,60	
2		0,70		Sandiger Lehm.
	176,94		1,30	
3		1,10		Feiner bis Mittelsand.
	175,84		2,40	
4		1,70		Mittel- bis grober Sand, stark grandig.
	174,14		4,10	
5		2,80		Mittel- bis grober Sand, schwach kalkhaltig, mit Mittelkies.
	171,34		6,90	
6		2,45		Grober Kies.
	168,89		9,35	
7		folgt		Grauer Kalkmergel.
	168,74		(9,50)	

Lage des natürlichen Spiegels: 3,65 m unter Flur.

„ „ Filterkorbes: in Schicht 5 und 6; Filterkorbunterkante 9,05 m unter Flur.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 10 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach $1^1/_4$ Stunden ein. Aus den letzten drei Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{4,70}{0,77} = 6,10 \frac{\text{sl}}{\text{m}}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte: 12,1° deutsch. Chlor: 8,4 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 9,2° C. bei einer Temperatur der Luft von 5,6° C.

Bohrloch Nr. 19, östlich von Skorkov,

ausgeführt in der Zeit vom 3. März bis 6. März 1902.

Nr. der Schicht	Kote m	Schichtenstärke m	Tiefe unter Flur m	Bezeichnung
	176,34		0,00	
1		0,60		Mutterboden.
	175,74		0,60	
2		5,40		Grober Sand, stark grandig (stark kalkhaltig).
	170,34		6,00	
3		folgt		Grauer Kalkmergel.
	170,14		(6,20)	

Lage des natürlichen Spiegels: 1,30 m unter Flur; steigt auf 1,25 m unter Flur.

„ „ Filterkorbes: in Schicht 2.

Beobachtete Ergiebigkeit: Mittels Baupumpe wurde 9 Stunden lang gepumpt. Der angenäherte Beharrungszustand stellte sich nach $1^1/_2$ Stunden ein. Aus den letzten drei Beobachtungen folgt als:

Spezifische Ergiebigkeit: $\frac{5,67}{0,60} = 9,45 \frac{\text{sl}}{\text{m}}$.

Beschaffenheit des Wassers: Aussehen: klar, farblos. Härte: 12,4° deutsch. Chlor: 8,4 lmg. Die Temperatur des Grundwassers beträgt 8,0° C. bei einer Temperatur der Luft von 2,3° C.

Beilage 2.

Ergebnisse der Messungen und Rechnungen.

Tabelle I.

Zusammenstellung

für freie Spiegel $\varepsilon = \frac{q\,(ln\,a_1 - ln\,a)}{\pi\,(h_1 + h)\,(s - s_1)}$; für gespannte Spiegel $\varepsilon = \frac{q\,(ln\,a_1 - ln\,a)}{2\pi\,m\,(s - s_1)}$.

Gruppe mit Angabe des Spiegelzustandes	Fördermenge q scbm	Abstand der Bohrungen a_1 in m	Abstand der Bohrungen a in m	$ln\,a_1$	$ln\,a$	$ln\,a_1 - ln\,a$	Mächtigkeit der wasserführenden Schicht in m	h_1 in m	h in m	$h_1 + h$ in m	s in m	s_1 in m	$s - s_1 = h_1 - h$ in m	Einheitsergiebigkeit ε in scbm
1—2 gespannt	0,00558	47,27	5,09	3,85	1,63	2,22	5,50				0,440	0,110	0,339	0,00106
3—4 gespannt	0,00450	64,16	5,09	4,16	1,63	2,53	5,90				0,091	0,046	0,045	0,00684
5—6 frei	0,00425	15,52	10,17	2,74	2,32	0,42	5,37	5,195	5,186	10,381			0,009	0,00616
7—8 gespannt	0,00565	24,95	5,10	3,21	1,63	1,58	5,90				0,341	0,267	0,074	0,00327
9—10 gespannt	0,00475	10,09	4,92	2,31	1,59	0,72	3,80				0,359	0,310	0,049	0,00291
11—12 frei	0,00563	10,23	4,81	2,32	1,57	0,75	6,38	6,212	6,174	12,386			0,038	0,00285
13—14 frei	0,00490	14,89	4,89	2,70	1,58	1,12	5,04	4,942	4,878	9,920			0,064	0,00276
15—16 frei	0,00550	10,31	5,23	2,33	1,65	0,68	6,09	5,998	5,977	11,975			0,021	0,00472
17—18 frei	0,00470	10,07	5,00	2,31	1,61	0,70	6,15	6,012	5,980	11,992			0,032	0,00272
19—20 frei	0,00567	9,92	5,05	2,29	1,62	0,67	4,78	4,039	4,014	8,053			0,025	0,00598

Tabelle II.

$$Q = \varepsilon\, i\, f.$$

Gruppe mit Angabe des Spiegelzustandes	Einheitsergiebigkeit ε in scbm	Natürliches spezifisches Gefälle, gemessen auf der Verbindungslinie zweier Bohrungen i_1	Unterschied zwischen gemessener und größter Gefällsrichtung α	$\cos\alpha$	$\frac{i_1}{\cos\alpha} = i$	Profillänge $\lambda + \lambda_1$ in m	Mächtigkeit der wasserführenden Schicht in m	Profilfläche f in qm	Ergiebigkeit Q scbm
1—2 gespannt	0,00106	0,00072	29°	0,875	0,00082	520	5,50	2860	0,0025
3—4 gespannt	0,00684	0,00146	27°	0,891	0,00164	710	5,90	4189	0,0470
5—6 frei	0,00616	0,00128	55°	0,574	0,00223	610	5,37	3276	0,0450
7—8 gespannt	0,00327	0,00157	63°	0,454	0,00346	450	5,90	2655	0,0301
9—10 gespannt	0,00291	0,00225	51°	0,629	0,00358	670	3,80	2546	0,0265
11—12 frei	0,00285	0,00161	19°	0,945	0,00170	780	6,38	4976	0,0241
13—14 frei	0,00276	0,00152	11°	0,982	0,00155	730	5,04	3979	0,0157
15—16 frei	0,00472	0,00212	41°	0,755	0,00281	590	6,09	3593	0,0477
17—18 frei	0,00272	0,00117	19°	0,945	0,00124	540	6,15	3321	0,0112
19—20 frei	0,00598	0,00082	22°	0,927	0,00085	530	4,78	2533	0,0129
							Summe der Ergiebigkeiten		0,2627

Tabelle III.

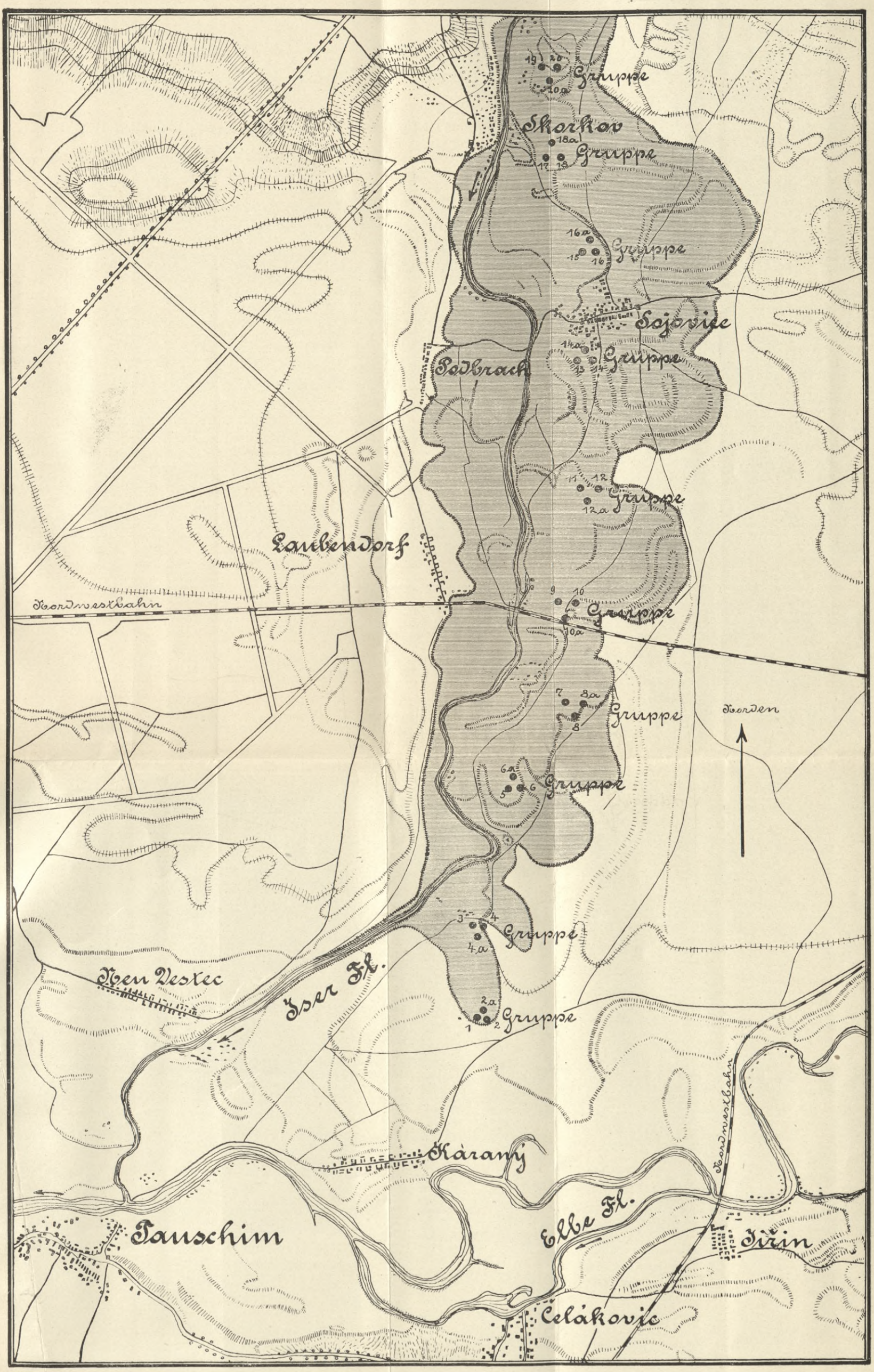
Gruppe	Entfernungen der Iser in m	Teilstücke der Profillänge einer Bohrungsgruppe λ m	λ_1 m	Profillänge $\lambda + \lambda_1$ m	Gegenseitige Entfernung der Gruppen in m	Profillänge zwischen 2 Gruppen in m
1—2	740	260	260	520		
					560	520
3—4	320	260	450	710		
					880	900
5—6	290	450	160	610		
					640	320
7—8	380	160	290	450		
					620	580
9—10	190	290	380	670		
					710	760
11—12	380	380	400	780		
					790	800
13—14	290	400	330	730		
					680	660
15—16	490	330	260	590		
					620	520
17—18	280	260	280	540		
					570	560
19—20	210	280	250	530		
Mittel	357			613	674	624
Summa					6070	5620

Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Uebersichtsplan.

1:25000.



Thiem, Hydrologische Methoden.

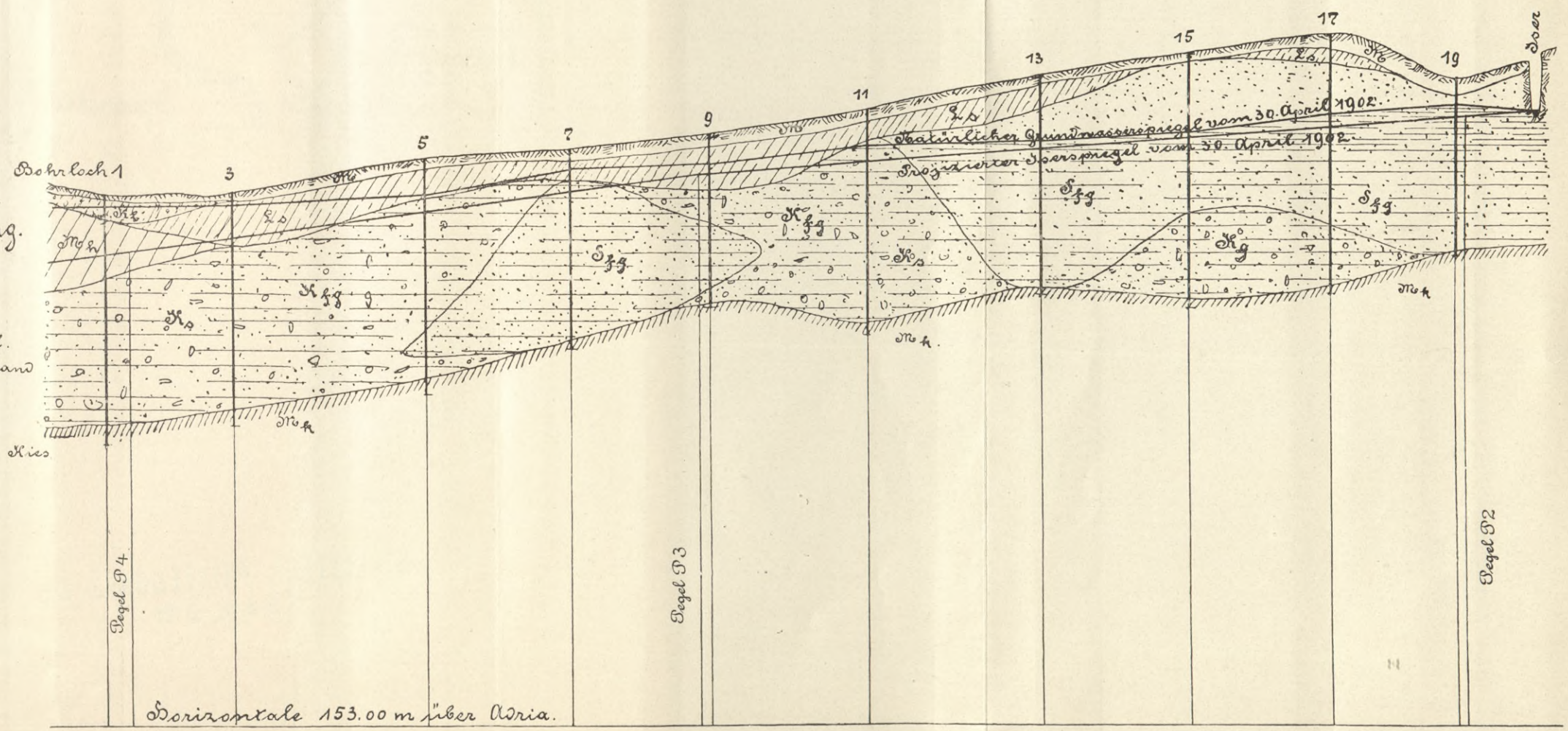
BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Blatt 2.

Geologisches und hydraulisches Profil.

Längen 1:25000.

Höhen 1:200.



Zeichenerklärung.

M. = Mutterboden.
Ls = Sandiger Lehm.
Mk = Humoser Mergel.
Sfg = Feiner bis grober Sand
Kl = Lehmiger Kies.
Ks = Sandiger Kies.
Kfg = Feiner bis grober Kies
Kg = Grober Kies.
Mk = Kalkmergel

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Blatt 3.

Lageplan der Bohrungen u. Profilzüge.

1:25000.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Diagramm der Ergiebigkeiten.

Q: Ergiebigkeit; ε Einheitsergiebigkeit; i Natürliches specifisches Gefälle; f: Benetzte Profilfläche.

$$Q = \varepsilon\, i\, f \quad \text{(Darcy)}$$

Maßstäbe in Meter und Sekunde.

l: Profillängen der Bohrungsgruppen 1:25000.

Die Werte sind als Flächen maß dargestellt.

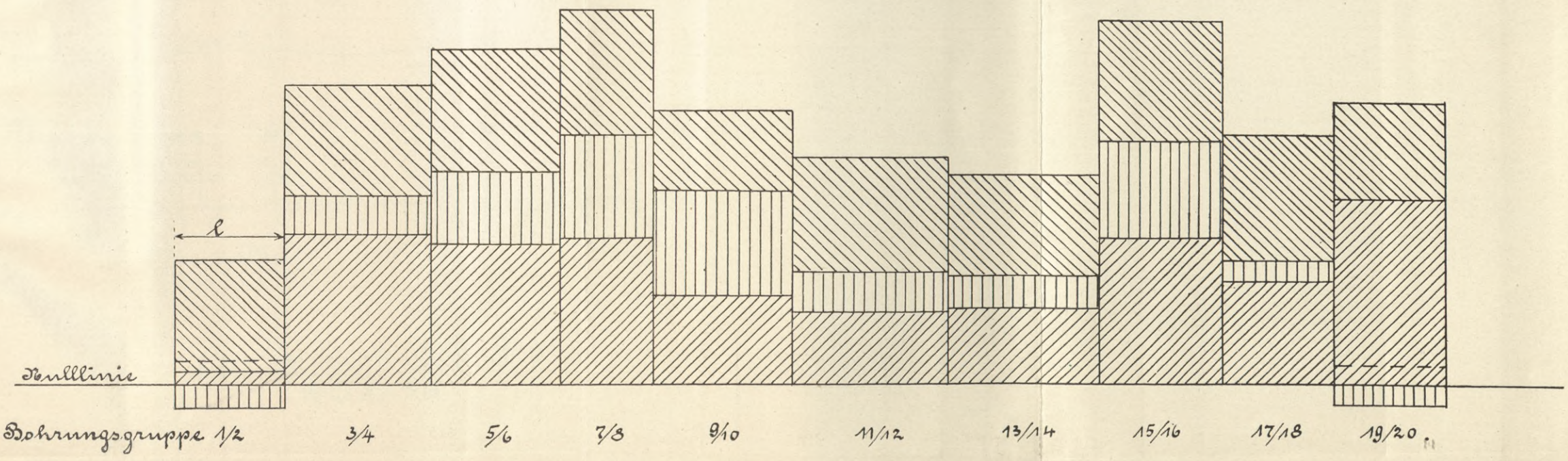
$$x_0 = \frac{\log \varepsilon + 3}{\log m} \; ; \quad 1000\,\varepsilon = m^{x_0} \; ;$$

$$x_1 = \frac{\log i + 3}{\log m} \; ; \quad 1000\, i = m^{x_1} \; ;$$

$$x_2 = \frac{\log f - 3}{\log m} \; ; \quad \frac{f}{1000} = m^{x_2} \; ;$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = \frac{\log Q + 3}{\log m} \; ; \quad 1000\, Q = m^{(x_0 + x_1 + x_2)}$$

$$m = 10^{1000}$$



BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Spiegelgänge der Iser.

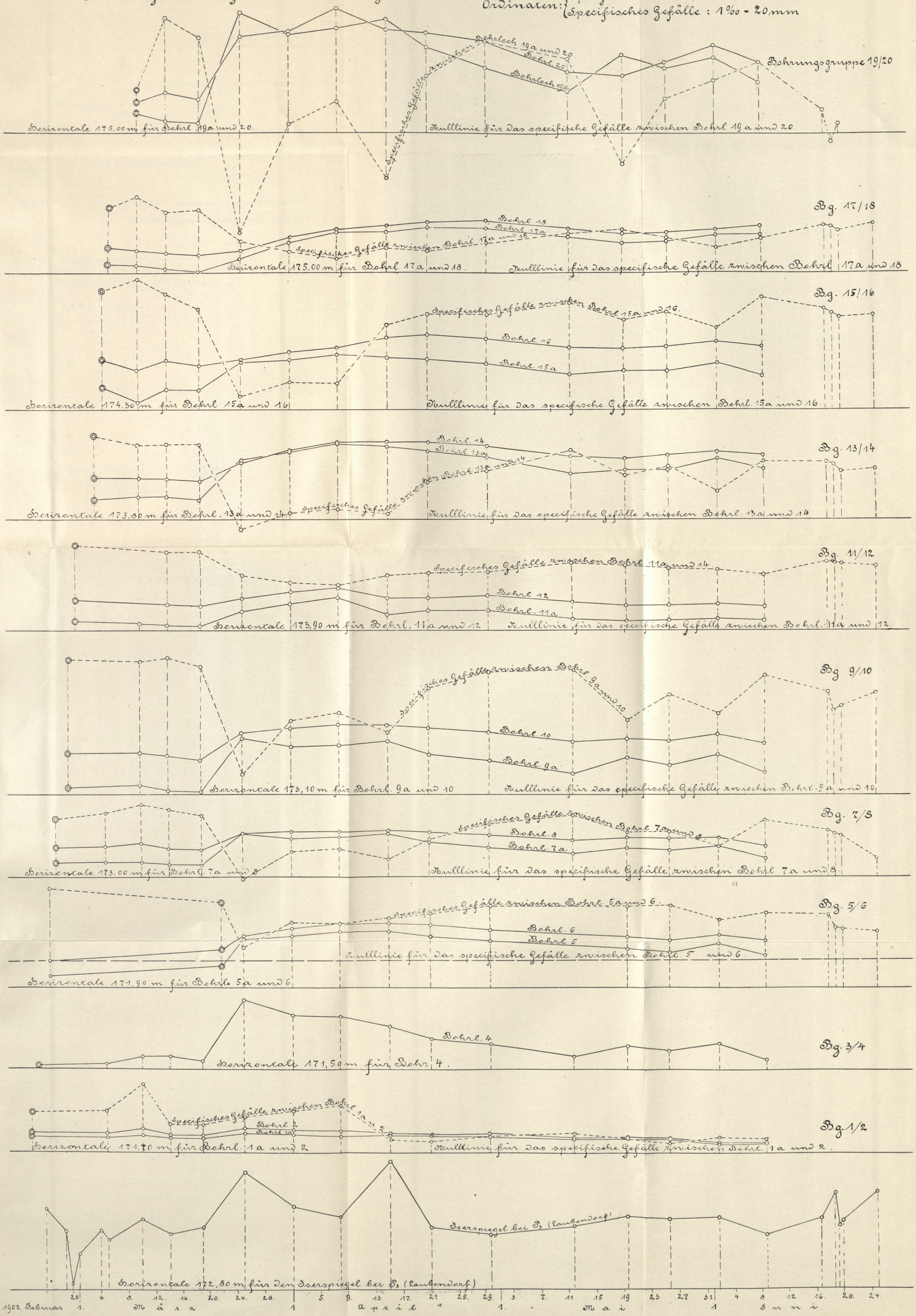
Abscissen: 0 1 2 3 4 5 Tage.
Ordinaten: 1 ..... 0 ..... 1 m

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

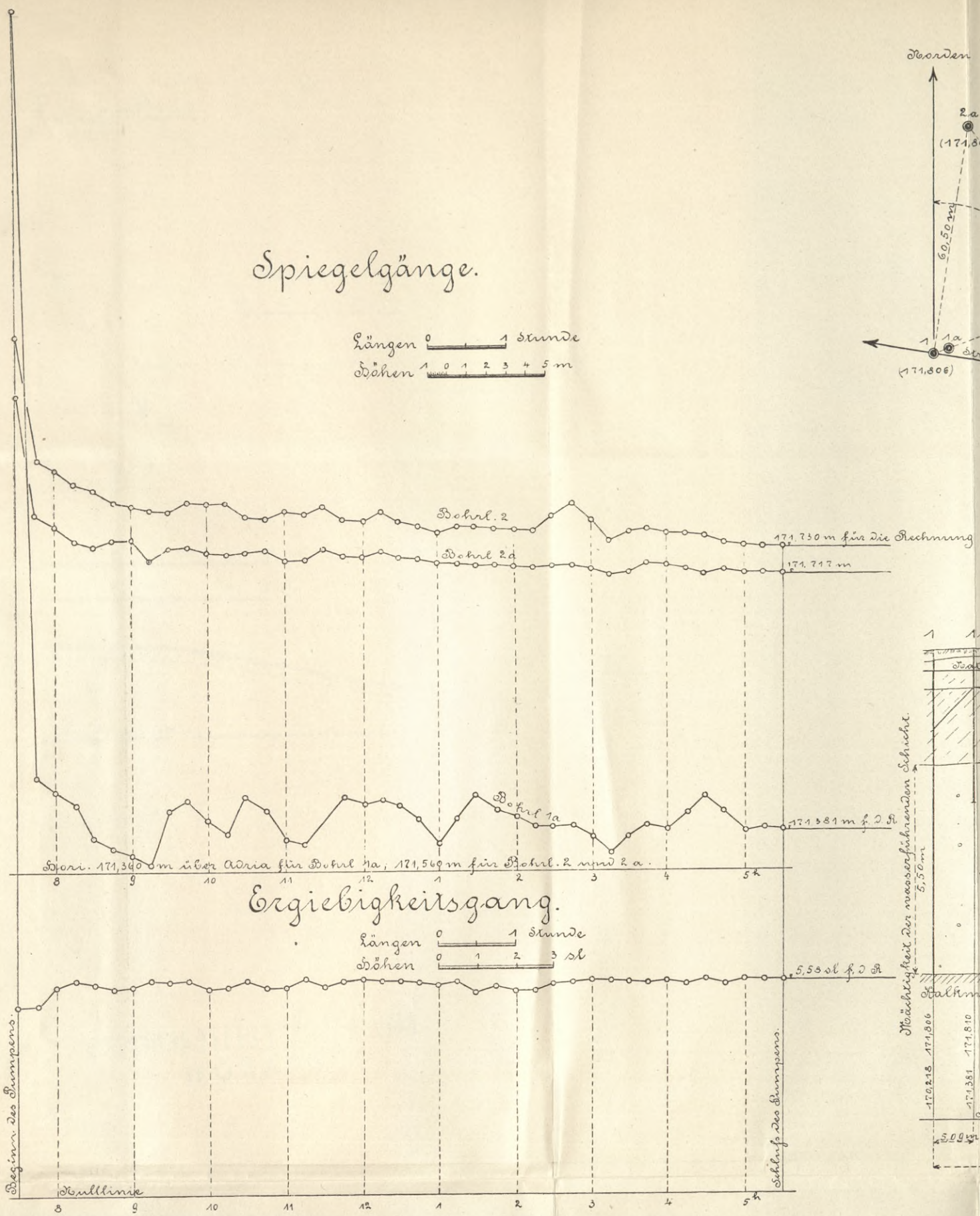
Gänge der Spiegel und des Grundwassergefälles.

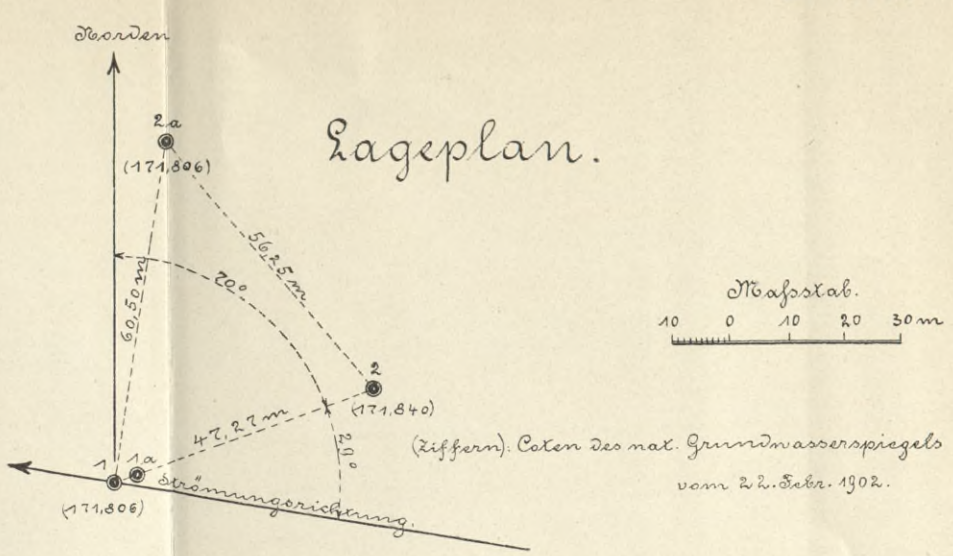
Horizont: Normal Null des Adriatischen Meeres.
◎ Messungen am Tage der Untersuchung.

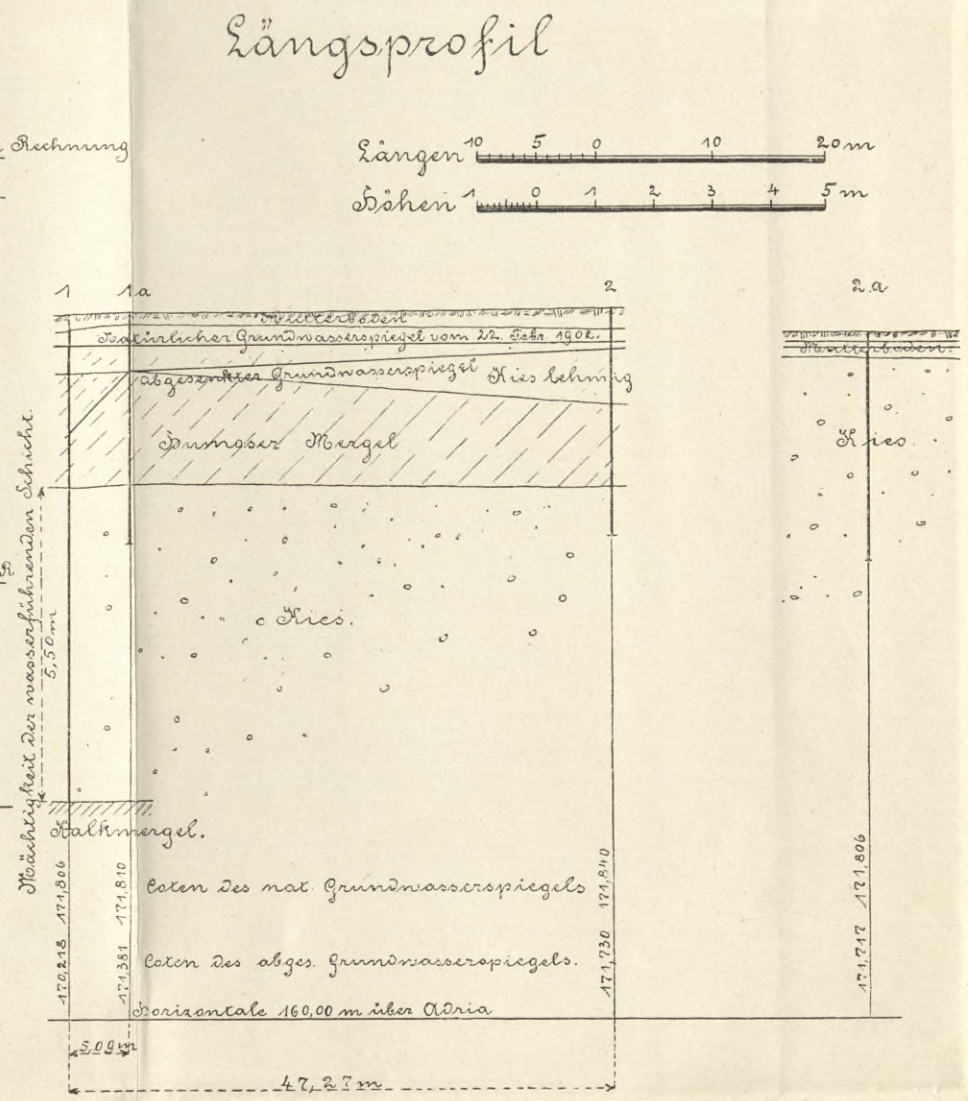
Abscissen: 1 Tag = 2,5 m
Ordinaten: Spiegelhöhen 1:20
Specifisches Gefälle : 1‰ = 20 mm



BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW


Spiegelgänge.
Längen 0 1 Stunde
Höhen 1 0 1 2 3 4 5 m
Bohrl. 2
Bohrl 2a
171.730 m für die Rechnung
171.717 m
Bohrl 1a
171.381 m f. d. R.
Spori. 171,340 m über Adria für Bohrl 1a; 171,560 m für Bohrl. 2 und 2 a.
8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 h
Ergiebigkeitsgang.
Längen 0 1 Stunde
Höhen 0 1 2 3 sl
5,58 sl f. d. R.
Beginn des Pumpens.
Schluß des Pumpens.
Nulllinie
8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 h

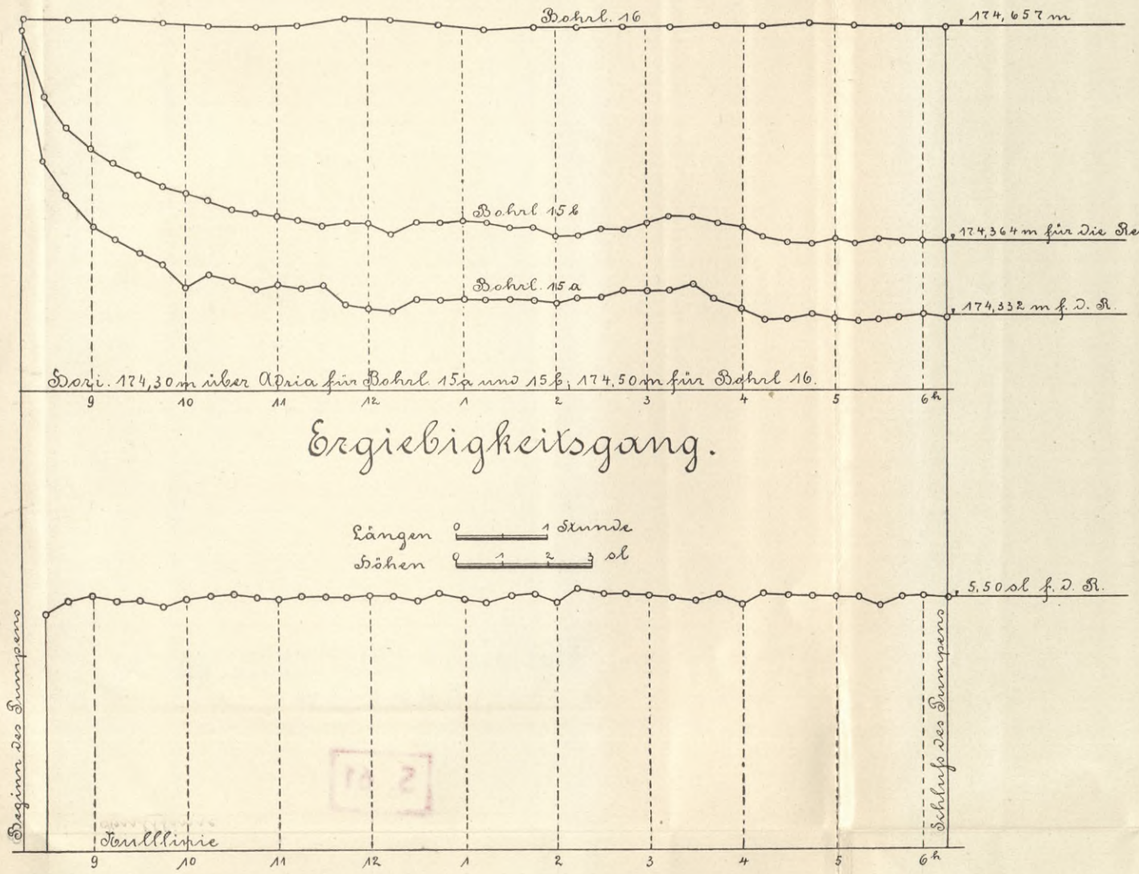

Norden
Lageplan.
2a
(171,806)
56,25 m
60,50 m
20°
2
(171,840)
47,27 m
20°
1
1a
(171,806)
Strömungsrichtung.
Maßstab.
10 0 10 20 30 m
(Ziffern): Coten des nat. Grundwasserspiegels vom 22. Febr. 1902.


Längsprofil
Längen 10 5 0 10 20 m
Höhen 1 0 1 2 3 4 5 m
1
1a
2
2a
Mittlerer Boden
Natürlicher Grundwasserspiegel vom 22. Febr. 1902.
abgesenkter Grundwasserspiegel
Kieslehm
Brunsber Mergel
Kies
Kies.
Mächtigkeit der wasserführenden Schicht.
5,50 m
Kalkmergel.
Coten des nat. Grundwasserspiegels
Coten des abges. Grundwasserspiegels.
Horizontale 160,00 m über Adria
170,218
171,806
171,381
171,810
171,730
171,840
171,717
171,806
5,09 m
47,27 m

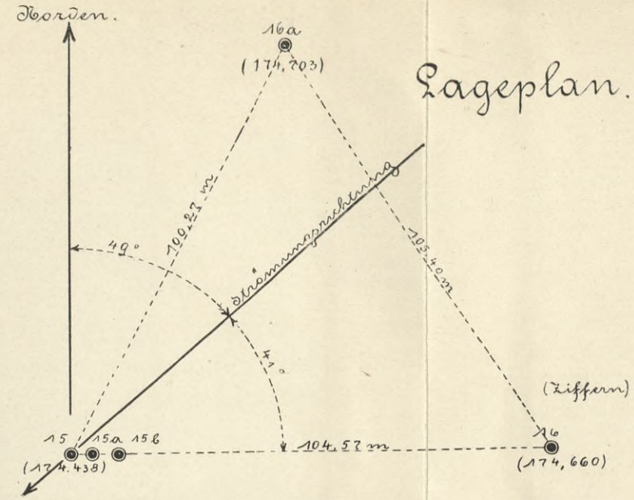
BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Spiegelgänge.

Längen 0 1 Stunde
Höhen 1 0 1 2 3 4 5 m



Lageplan.

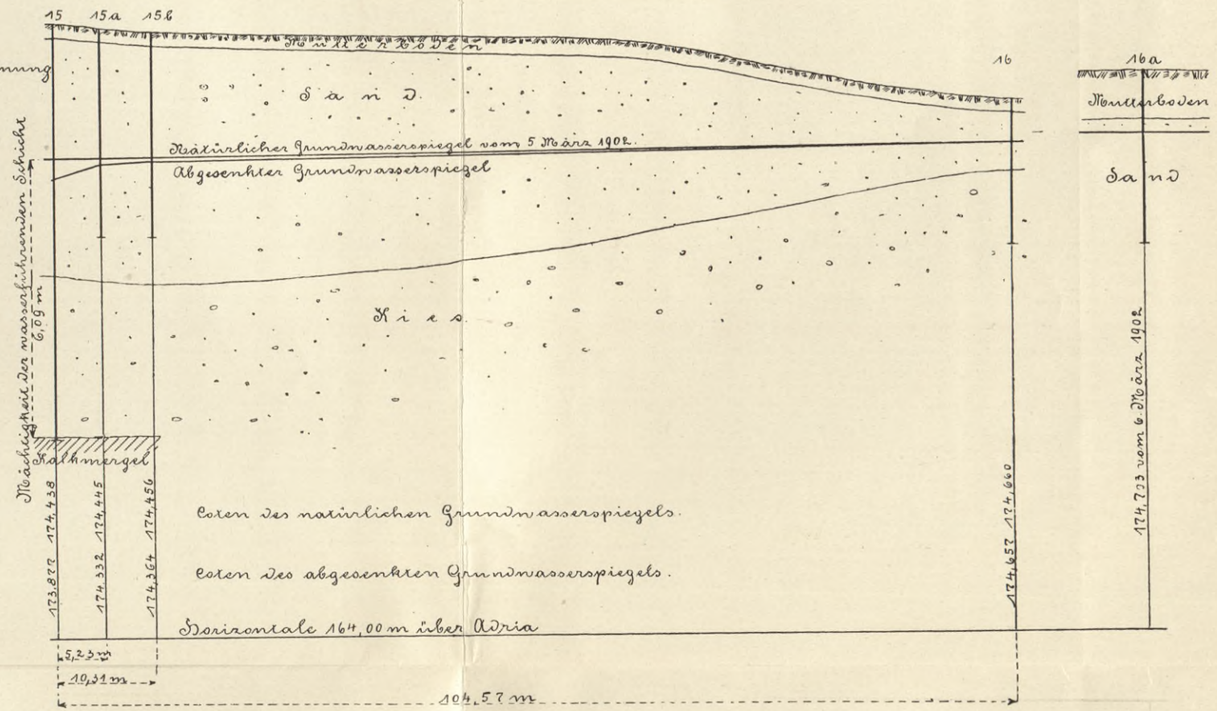


Maßstab
10 0 10 20 30 m

(Ziffern): Coten des natürlichen Grundwasserspiegels vom 6. März 1902.

Längsprofil.

Längen. 10 5 0 10 20 m
Höhen. 1 0 1 2 3 4 5 m



BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

S. 61

15 2

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW
BIBLIOTEKA GŁÓWNA
II
L. inw. 31167
Kdn., Czapskich 4 — 678. 1. XII. 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej
100000300005