Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 35 (1943)

Heft: 7-8

Artikel: Untersuchungen über Abdichtungserscheinungen im Staugebiet des Kraftwerkes Wettingen

Autor: Hug, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-921329

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

1915 Mois	Matières en suspension calculée d'après les prises en surfaces en tonnes
janvier	43 226
février	14 141
mars	19 053
avril	76 623
mai	276 753
juin	296 673
juillet	458 880
août	179 808
septembre	65 012
octobre	15 638
novembre	69 281
décembre	196 863
	1 711 951

En multipliant de même 1 711 951 × 2,129 = 3 644 667 tonnes, on obtient les matières en suspension transportées par l'Arve en 1915, ce qui représente 1822 tonnes par kilomètre carré du bassin d'alimentation ou, avec la même densité de 1,5, un total de 1214 mètres cubes par an et par kilomètre carré.

Pour 1933, Léon-W. Collet et J. Buffle ont fait à la Société de Physique et d'Histoire naturelle de Genève une communication (Vol. 51, No. 2, avril-juillet 1934), d'où il ressort que, du point de vue hydrographique, le débit moyen de l'Arve fut très près de celui de 1890. Le débit annuel moyen de la période de 1904 à 1933 avait été de 84,15 m^3/sec. Pour le charriage d'alluvions, ils avaient obtenu les résultats suivants:

1933 Mois	Matières en suspension en tonnes
janvier	331
février	9 442
mars	16 205
avril	8 574
mai	75 909
juin	183 464
juillet	244 279
août	104 849
septembre	57 520
octobre	47 556
novembre	6 085
décembre	514
	754 728

La charge totale de matières en suspension en 1933 a donc été de 754 728 × 2,1 = 1 585 000 tonnes.

Les trois années pendant lesquelles le charriage de l'Arve a été observé présentent de grandes différences, qui s'expliquent par le fait que le débit moyen annuel a été lui-même en dessous de la moyenne en 1890 et 1933 et en dessus en 1915.

Les matières roulées sur le fond

D'après les observations de M. Kündig à Genève, l'Arve charrierait annuellement 109 500 mètres cubes de matériaux roulés sur le fond jusqu'à Genève.

Conclusion

Nous ne disposons pas encore de données très complètes sur le charriage d'alluvions de l'Arve, puisque ce cours d'eau n'a été étudié à ce point de vue qu'à trois reprises, chaque fois pendant une année complète. Les trois périodes d'observation ont cependant présenté des caractères assez différents pour qu'on puisse envisager que le charriage de matières en suspension doit représenter annuellement au moins 1 500 000 tonnes et peut dépasser 3 600 000 tonnes. Les matériaux roulés sur le fond jusqu'à Genève représenteraient de leur côté un total d'environ 110 000 mètres cubes par an.

Untersuchungen über Abdichtungserscheinungen im Staugebiet des Kraftwerkes Wettingen

Von Dr. *J. Hug*, Zürich

1. Einleitung

Schon vor Beginn der Bauarbeiten für das Kraftwerk Wettingen war man sich darüber klar, dass wegen der besonderen hydrologischen Verhältnisse der ausgenützten Strecke des Limmattales als Folge der Inbetriebsetzung des Werkes sich gewisse Aenderungen der Grundwasserführung einstellen werden. Diese Feststellungen liessen es als notwendig erscheinen, beim Kraftwerk Wettingen weitergehende hydrologische Untersuchungen durchzuführen, als es bis jetzt bei anderen Projekten als ausreichend erachtet wurde. Das Werk kam Ende April 1933 mit der vollen Stauhöhe in Betrieb, die Erhebungen setzten aber schon Ende 1932 ein, so dass der frühere natürliche Zustand genau festgelegt werden konnte. Heute stehen nun die Resultate einer zehnjährigen Beobachtungsperiode zu Gebote. Aus dem umfangreichen, mannigfaltigen Material greifen wir diejenigen Feststellungen heraus, die über die Abdichtungserscheinungen im Bereiche der Staustrecke genauere

Anhaltspunkte liefern. Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Ausführungen sollen die geologischen Verhältnisse der Strecke des Limmattales zwischen Killwangen und Baden kurz dargestellt werden.

2. Kurze Orientierung über die geologisch-hydrologischen Verhältnisse des Limmattales bei Wettingen

a) Zur Entstehung der als Grundwasserträger wirkenden Schotteraufüllung

Schon im Jahre 1917 hatten wir in unserem Werke über «Grundwasservorkommnisse der Schweiz», Band II der Annalen der Schweiz. Landeshydrographie, Seiten 110—124, die Grundwasserverhältnisse des Limmattales von Zürich bis über Baden hinaus geschildert. Die zahlreichen seither in diesem Gebiete ausgeführten Sondierbohrungen haben in grossen Zügen die in der genannten Publikation niedergelegten Auffassungen bestätigt. Für unsere weiteren Schilderungen verweisen wir auf die Kartenskizze von Abb. 1. Neben dem Laufe der Limmat auf der Strecke von Killwangen bis unterhalb Baden wurde noch ein mehr oder weniger breiter Streifen eingetragen, der das *interglaziale,* durch eine Schotteraufüllung gleichsam «versteinerte» alte *Limmattal* mit dem zugehörigen Grundwasserstrom darstellt. Im Bereiche dieses Streifens haben eine grössere Zahl von Grundwasserbohrungen, die wir zum grösseren Teil selber anordnen konnten, überall den *durchlässigen,* eiszeitlichen, stellenweise *zu lockerer Nagelfluhe verkitteten Schotter* aufgeschlossen. Daneben fehlt es auch nicht an einigen Moräneneinlagerungen, wir denken dabei besonders an die grobblockigen Schichten in den obersten Partien der Terrasse und einige kleinere sandig-lehmige Einlagerungen in grösserer Tiefe. Diese Einlagerungen vermögen aber die Hydrologie des Tales nicht wesentlich zu kennzeichnen, wir haben nur mit den Schottern zu rechnen. Weitere Anhaltspunkte zur Bestimmung der Verbreitung des alten Tales hat auch die Untersuchung der Uferhänge des Limmattales geliefert. An den Stellen, wo der Einschnitt der Limmat in das Gebiet des alten Tales fällt, müssen an den Uferhängen die Schotter anstehen. Im Gegensatze dazu werden die ausserhalb des alten Tales fallenden Strecken geologisch dadurch gekennzeichnet, dass am Ufer und im Flussbette die *anstehenden Felsschichten* zutage treten.

Dieser das interglaziale Tal einfassende Fels besteht fast überall aus Süsswassermolasse, nur im Bereiche des Durchbruches durch das Lägerngewölbe stehen die Jura- und Triasschichten mit den Badener Thermalquellen an. Diese Zone der Felseinfassung des alten Tales wurde auf unserer Kartenskizze mit einer besonderen Bezeichnung dargestellt. Bemerkenswert sind ferner die Feststellungen, die über die *Tiefe des alten Tales* gemacht werden konnten. Die Tiefbohrungen, welche in der Zone der tiefsten Rinne abgeteuft worden sind, gehen bis nahezu 30 m unter das Niveau der heutigen Limmat, ohne dass dabei die Sohle des Schotters erreicht wurde.

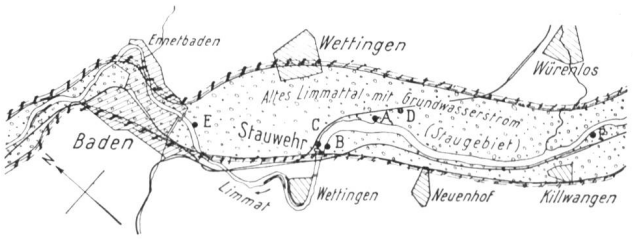

Abb. 1 Kartenskizze der Schotteraufüllung mit dem Grundwasserstrom des Limmattales von Killwangen bis Baden. Die Darstellung gibt die Verbreitung ungefähr im Niveau der ungestauten Limmat an.
A—F: Grundwasserbeobachtungsstellen. (Nr. 6398, BRB. 3. 10. 39.)

Auf Grund dieser geologischen Anhaltspunkte kommen wir zur folgenden *Entwicklung des Limmattales* für das Kraftwerkgebiet: Um die Mitte des Eiszeitalters hat, wie in anderen Tälern, der Flusslauf ein sehr breites Tal bis zu einer Tiefe eingeschnitten, die mindestens 30 m unter das heutige Flussniveau gereicht haben muss. Es enstand so das sog. *Urstromtal* des Limmatgebietes. Während der darauffolgenden Eiszeiten wurde aber die ganze Talrinne bis zum Niveau der grossen Terrassenfläche von Wettingen-Baden vorwiegend mit Schotter aufgefüllt, wobei es nicht ohne Wechsel von zeitweiser Erosion und Wiederauffüllung abging. Als dann am Ende der letzten Eiszeit sich die Limmat wieder einzuschneiden begann, hat sie an verschiedenen Stellen ihr früheres Bett nicht mehr getroffen. An den betreffenden Stellen musste sie sich im Gebiet ausserhalb der Schotter des alten Tales schluchtartig in den anstehenden Fels einschneiden. Es kam so zur Bildung der sog. *epigenetischen Talstücke.*

b) Bildung des Grundwassertromes

Bei der grossen Durchlässigkeit der ausgedehnten Schottermassen musste sich darin ein grosser Grundwasserstrom bilden, der auf der Bahn des Urstromtales langsam abfliesst. Es entstand so gleichsam ein hydrologisches Konkurrenzunternehmen zu der Wasserführung der Limmat, das in seiner Bedeutung nicht unterschätzt werden darf. Ueber die besonderen Verhältnisse dieser Grundwasserführung standen uns eine Reihe von Anhaltspunkten zur Verfügung, die wir im folgenden in einigen der wichtigsten Punkte zusammenstellen:

a) Beim Bau der alten Wasserfassung der Gemeinde Wettingen, die schon vor Beginn des Kraftwerkbetriebes infolge der Lage im Staugebiete verlegt wurde, konnte der Grundwasserspiegel erst in einer Tiefe von ca. 4 m unter dem Spiegel der Limmat (ungestaut) erreicht werden. (Punkt A der Kartenskizze.)

b) An der Kreuzungsstelle von Limmat und Grundwasserstrom in der «Aue» bei Baden oberhalb der Hochbrücke konnte beobachtet werden, dass im Unterwasserkanal des oberen Elektrizitätswerkes der Stadt Baden grosse Mengen von Grundwasser sichtbar zutage traten. Der Grundwasserspiegel stellt sich also hier *über* dem Flusswasserspiegel ein, der letztere bildet gleichsam die *Vorflut für den Grundwasserstrom* (Punkt E).

c) Wenn man die hydrologischen Verhältnisse dieser beiden Punkte A und E miteinander in Beziehung bringt, so erkennt man deutlich, dass die *Gefällsverhältnisse von Fluss und Grundwasser* nicht miteinander übereinstimmen. Beim Grundwasserstrom bemerkt man auf der Strecke zwischen den beiden Eisenbahnbrücken, d. h. also bei der nach links gerichteten Biegung unmittelbar unterhalb des Kraftwerkstauwehres ein starkes Gefälle, eine Art Stromschnelle. Im Grundwasserstrom dagegen gleicht sich der Gefällebruch auf einer grösseren Strecke aus. So kommt es zu der eigenartigen Erscheinung, dass bei Punkt A der Grundwasserspiegel dauernd *unter* die Limmat sich einstellte. Als der Brunnen bei Punkt A erstellt wurde, konnte nahe bei der Limmat unter ihrem Spiegel der Schacht bis 4 m unter dem Fluss im trockenen Kies abgeteuft werden. Es musste aus dieser Feststellung geschlossen werden, dass das Bett der Limmat trotz der Kieszusammensetzung des Untergrundes vollkommen abgedichtet ist. Dieselben Beobachtungen hatten wir an zahlreichen geologisch analogen Flußstrecken sammeln können. Fast jede Stromschnelle der Flüsse des Mittellandes hat für die entsprechende Strecke des zum Tale gehörenden Grundwassers das Niveau des Flusses zur Folge. Zuerst fiel uns diese Erscheinung im Jahre 1909 bei Anlass der Begutachtung von Bohrungen in und neben dem Rhein bei Flurlingen oberhalb des Rheinfalles auf. An dieser Kreuzungsstelle von Fluss und Grundwasserstrom konnte im Bette des Rheines nicht gebohrt werden, weil das für den Bohrprozess notwendige Wasser nicht vorhanden war. Erst etwa 7 m unter dem Rheinspiegel stellte sich der Grundwasserspiegel ein. Vielleicht gibt eine spätere Veröffentlichung Gelegenheit, auf die festgestellten Depressionszonen (Strecken mit Verlauf des Grundwasserspiegels unter dem Fluss) näher einzutreten. Auf alle Fälle kann festgehalten werden, dass an solchen Strecken der Flüsse trotz der Zusammensetzung des Flussbettes aus durchlässigem Kiese eine restlose Abdichtung des Flussbettes sich herausbilden muss.

Man war auch darüber orientiert, wie weit die Depressionszone der Limmat talaufwärts reichte. Schon in unserer Publikation von 1917 hatten wir erwähnt, dass im «Kessel» oberhalb der Station Killwangen ein Grundwasseraufstoss vorhanden ist, bei dem infolge des Ueberdruckes vom Grundwasser zum Fluss Wasser abgestossen werden kann. An diesem Punkte haben wir also wieder normale Vorflutverhältnisse, indem der Grundwasserspiegel durch den Fluss gehalten wird.

3. Anordnung der Grundwasserbeobachtungen

Bei den geschilderten geologisch-hydrologischen Verhältnissen des Limmattales bei Wettingen war es aus verschiedenen Gründen notwendig, die Entwicklung des Grundwassers als Folge der Einwirkungen des Kraftwerkstaues durch eine geeignete Anordnung von fortlaufenden Beobachtungen möglichst in allen Phasen zu verfolgen. Wir stützen uns für die weiteren Ausführungen auf die an den folgenden Punkten erhobenen Feststellungen:

a) Schacht beim Maschinenhaus am rechtseitigen Ufer der Limmat (Punkt B der Kartenskizze).

b) Besonders wichtig erschien uns die Erstellung eines Beobachtungsschachtes auf der linken Limmatseite. Es musste hier ein tiefer Schacht gegraben werden (Punkt C).

c) Sehr wichtig sind die Erhebungen im Schachte der neuen Grundwasserfassung der Gemeinde Wettingen (Punkt D der Kartenskizze). Da die alte, bereits erwähnte Fassung überstaut wurde, musste eine neue Anlage erstellt werden. Da kein tiefer gelegener Punkt mit ausreichend grosser Entfernung von der gestauten Strecke zur Verfügung stand, konnte nur ein Punkt im Tägerhard auf der Terrassenfläche vorgeschlagen werden. Es bedingte dies die Abteufung eines 43 m tiefen Schachtes bis auf den Grundwasserspiegel. Unter diesem wurde der Grundwasserträger noch mit einer Mächtigkeit von 13 m erschlossen. Mit Ausnahme von blockigen Moräneneinlagerungen in den obersten Schichten und einigen schlammigen Einlagerungen in den untersten Partien wurde durchwegs der typische, stellenweise zu Nagelfluhe verkittete Schotter durchfahren, wie er in der Auffüllung der Urstromtäler allgemein angetroffen wird.

d) An der Austrittstelle des Grundwasserstromes in der Aue bei Baden konnte das Niveau des Grundwassers im dort bestehenden Brunnen der Stadt Baden beobachtet werden (Punkt E); später kamen in

dieser Zone noch eine Reihe weiterer Beobachtungspunkte hinzu.

e) In der ersten Zeit stand auch noch ein Beobachtungspunkt in der grossen Kiesgrube Neuenhof, etwa 0,9 km oberhalb des Stauwehres auf der linken Limmatseite, zur Verfügung. Der Grundwasserspiegel sank aber schon in den ersten Jahren nach Einleitung des Staues, zunächst nur während der Wintermonate, nach zwei Jahren dauernd, unter die Schachtsohle ab, so dass eine weitere Verfolgung des Grundwasserspiegels an dieser Stelle aufgegeben werden mußte.

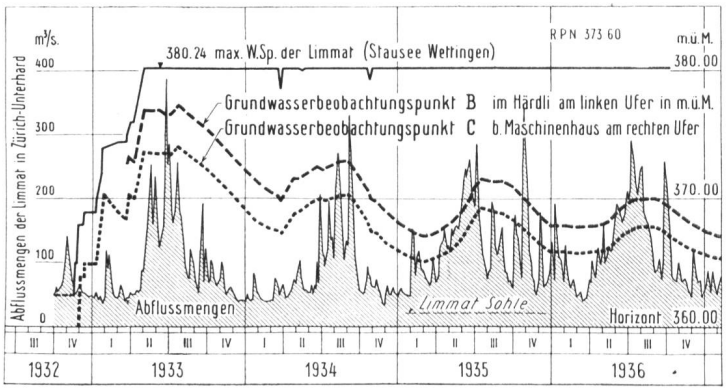

Abb. 2 Darstellung der Wasser-Spiegelschwankungen der Limmat und der Beobachtungspunkte.

Die Beobachtungspunkte Nr. B, C und E sind durch den Bauleiter des Kraftwerkes, Oberingenieur Bertschi, angeordnet worden; er hat auch für ununterbrochene Beobachtung der Grundwasserspiegel an den betreffenden Stellen gesorgt. Der Punkt D (die Wasserfassung Wettingen) wurde unter der Leitung der Direktion der städtischen Wasserversorgung Zürich erstellt. Direktor Lüscher war für die ununterbrochene Fortführung der verschiedenen Arten von Erhebungen besorgt. Oberingenieur Bertschi und Direktor Lüscher hatten ferner die Freundlichkeit, uns das gesamte Material zu überlassen, soweit dies für die Untersuchungen über die Abdichtungsvorgänge im Staubecken notwendig war. Es sei den beiden Herren an dieser Stelle für ihr Entgegenkommen und das Interesse, das sie unseren Bestrebungen zur Abklärung der eigenartigen Hydrologie des Limmatgebietes entgegengebracht haben, herzlich gedankt.

An den genannten Punkten sind die Beobachtungen schon vor Beginn der Stauhaltung des Kraftwerkes eingeleitet und seither ununterbrochen fortgesetzt worden. Heute liegt nun ein ausserordentlich umfangreiches Beobachtungsmaterial vor, das über die Beziehungen der Stauhaltung des Kraftwerkes zum Grundwasserstrom wertvolle Anhaltspunkte liefert. Wir fassen in den folgenden Ausführungen nur diejenigen Beobachtungsergebnisse zusammen, die geeignet erscheinen, eine Gesetzmässigkeit in der Entwicklung der Abdichtungserscheinungen im Staugebiet mit ganz verschiedenen Beweismethoden abzuleiten. Wir treten zuerst ein auf das

4. Verhalten des Grundwassers zur Zeit der ersten Etappe des Aufstaues

Wir verweisen auf die Darstellung von Abb. 2 mit den graphischen Auftragungen der Spiegelschwankungen. Schon bei der Einleitung des Staues im Dezember 1933 von Kote 362,50 auf 369 stieg der Grundwasserspiegel sofort nach, ohne freilich die Stauhöhe zu erreichen. Der Grund liegt darin, dass das im Staugebiet zur Versickerung gelangende Wasser auf dem Wege des alten Tales als Bereicherung des Grundwasserstromes weiterfliessen konnte. Die Vermehrung der Grundwasserführung musste sich natürlich sofort nach Einleitung des Staues durch eine Erhöhung des Grundwasserspiegels an der Vorflutstelle in der «Aue» bei Baden bemerkbar machen. Um die aus der Spiegelerhöhung erwachsenden Nachteile zu beheben, musste eine Drainage erstellt werden mit der Aufgabe, das über das frühere Niveau hinaus aufsteigende Grundwasser abzuleiten. Es konnte so eine *Fixierung der Spiegelhöhe* in der Richtung nach oben erreicht werden. Erst nach Fertigstellung der Entwässerungsanlage in der «Aue» wurde dann die Erhöhung des Staues auf die konzessionierte Kote von 380,24 fortgesetzt.

5. Verhalten des Grundwasserspiegels nach Erreichung der normalen Stauhaltung

Unmittelbar nachdem die Stauhöhe erreicht war, stellte sich das Grundwasser auf seinen Maximalstand ein. Besonders interessant ist ein Vergleich der Spiegelhöhe des Grundwassers auf beiden Seiten der Limmat; die Erstellung der beiden Beobachtungsschächte links und rechts oberhalb des Stauwehres ermöglichte die entsprechenden Feststellungen. Die Daten sind auch in Abb. 3 als Querschnitt durch die gestaute Limmat eingetragen.

Im Schachte der linken Flußseite erreicht der Grundwasserspiegel zu Beginn der vollständigen Einstauung Kote 377,00, d. h. er kommt bis 3,2 m unter das Stauniveau. Auf der rechten Flußseite konstatieren wir aber zu gleicher Zeit nur eine Spiegelhöhe von 373,80, also 3,2 m weniger als auf der andern Seite im gleichen Profil. Aus Abb. 1 und 3 lässt sich die Erklärung für diese Erscheinung ohne weiteres ableiten. Da der Lauf der Limmat in dieser Zone eine

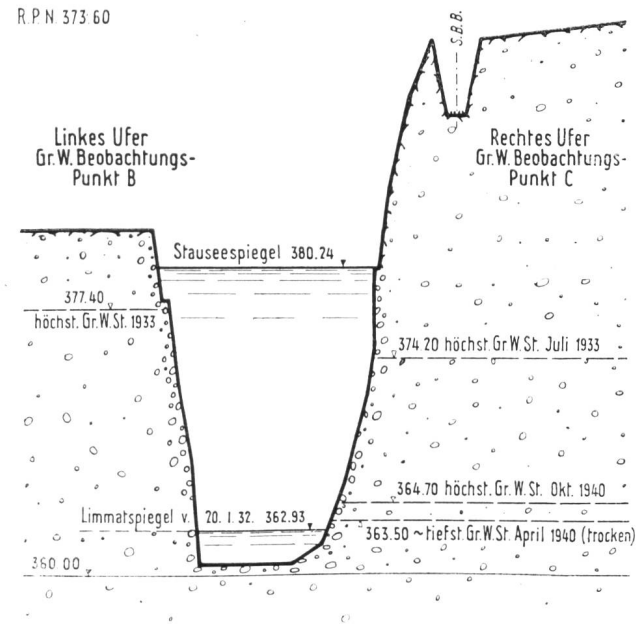

Abb. 3 Hydrologisches Querprofil durch die gestaute Limmat etwas oberhalb des Stauwehres, mit Angabe des Stauspiegels und den Grundwasserständen der Beobachtungspunkte B und C.

Strecke weit fast quer zur allgemeinen Talrichtung und damit zum Grundwasserstrom geht, muss die Wasserfüllung der Staustrecke eine stauende Wirkung auf das Grundwasser der linksseitigen Komponente des Grundwasserstromes ausüben.

6. Weiterer Verlauf der Spiegelschwankungen

Die weitere Entwicklung der Spiegelschwankungen des Grundwassers in unseren Beobachtungspunkten ergibt sich klar aus unserer Abb. 2. Das innere Leben des Grundwasserstromes in seinem Kampfe mit der durch den Stau vermehrten Infiltration aus dem Flussbette spiegelt sich in diesen Kurven in imposanter Weise wider. Während der Stau dauernd auf der konzessionierten Höhe von Kote 380,24 gehalten wird, beobachten wir beim Grundwasser ein gewisses Schwankungsregime. Genau wie bei den Strecken des Grundwasserstromes ausserhalb der Einflusszone des Kraftwerkes konstatieren wir eine ausgesprochene Jahreszeitenschwankung mit Minimum im Winter und Maximum im Sommer. Genau so sehen auch alle Kurven der zahlreichen Beobachtungspunkte im Raume zwischen Dietikon und Zürich aus, die wir für den Zeitraum von 1921 bis 1933 publiziert hatten. (Siehe unsere Ausführungen in «Grundwasserverhältnisse des Kantons Zürich».) Die Kurven des Grundwassers von Wettingen lassen nun aber ausser den normalen Jahreszeitenschwankungen noch eine andere Gesetzmässigkeit erkennen. Diese Eigenart besteht darin, dass sich der maximale Stand jedes folgende Jahr wesentlich tiefer einstellt. Dasselbe Verhalten kommt auch beim Winterminimum zu deutlich zum Ausdrucke. Wenn wir z. B. in unserem Profil von Abb. 3 den niedersten Stand des Jahres 1938 eintragen, so sehen wir, dass das Grundwasser nicht weniger als 15,4 m unter dem Stauspiegel sich einstellt und zwar in unmittelbarer Nähe der gestauten Limmat.

Das unaufhaltsame Absinken des Grundwasserspiegels hat leider auch der weiteren Beobachtung einen bösen Streich gespielt, indem er zu Anfang des Jahres 1940 überhaupt unter die Sohle der Schächte abgesunken ist. Glücklicherweise konnten aber die Beobachtungen bei Punkt D (Filterbrunnen der Gemeinde Wettingen) weitergeführt werden. Bis dahin waren die Schwankungen an diesem Punkte immer ziemlich parallel mit dem Spiegel der Punkte beim Maschinenhaus verlaufen. Wenn wir vom Punkte D aus interpolieren, so kommen wir für den minimalen Stand des Jahres 1940 für Punkt B auf der rechten Limmatseite auf Kote 363,50, d. h. ganz nahe dem Niederwasserstand der Limmat vor dem Aufstau, oder nicht weniger als 16,74 m unter den Stauspiegel.

7. Unregelmässiges Verhalten des Grundwasserspiegels im März 1934

Während die Kurven im Rahmen der Jahreszeitenschwankungen im allgemeinen ein gesetzmässiges Absinken erkennen lassen, zeigt die Darstellung der Spiegelbewegungen im März 1934 ein ungesetzmässiges Verhalten. Alle Kurven steigen ganz unvermittelt an, so dass in der Kurve eine Spitze entsteht, die wir nach dem Zeitpunkte des Aufstaues nicht mehr konstatieren können. Zur weiteren Orientierung über die Ursachen dieser Kurvenspitze haben wir in unserer Darstellung auch noch die Wassermengen der Limmat eingetragen. Ein Blick auf die Wassermengenkurve berechtigt zu der Schlussfolgerung, dass das plötzliche Ansteigen des Grundwasserspiegels durch die Wasserführung der Limmat nicht verursacht sein kann.

Eine einwandfreie Lösung des Rätsels liefert uns aber die Kurve der Stauhaltung. Wir erkennen hier eine scharfe Knickung. Oberingenieur Bertschi hat uns dahin informiert, dass damals der Stau zur Ausführung von Ergänzungsarbeiten um 2,5 m abgesenkt werden musste. Wir müssen so zu folgender Erklärung der Unregelmässigkeit im Verlauf der Grundwasserkurve vom März 1934 kommen:

a) Infolge der durch die Absenkung des Stauspiegels bewirkten Aenderungen der Druckverhältnisse in der Limmat wurde die Entwicklung der Kolmatierung im Flusse empfindlich gestört, so dass unvermittelt die Zunahme der Infiltration aus dem Flussbett den Grundwasserspiegel ansteigen liess.

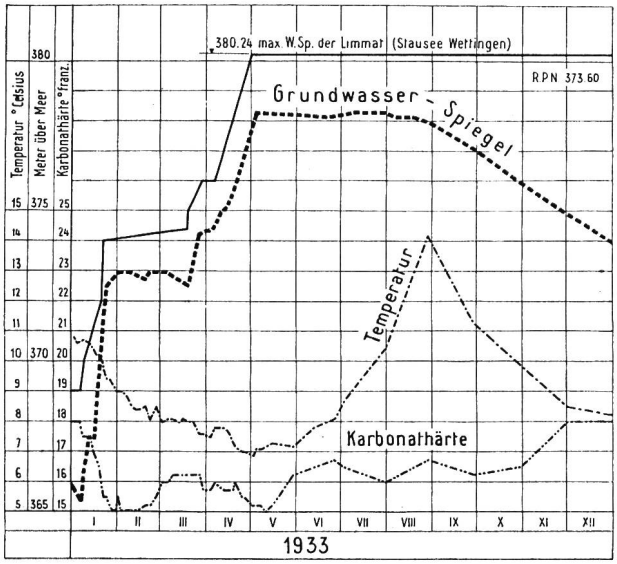

Abb. 4 Darstellung von Spiegelhöhe, Karbonathärte und Temperatur des Grundwassers in der Wasserfassung Wettingen (Punkt D) für das Jahr 1933.

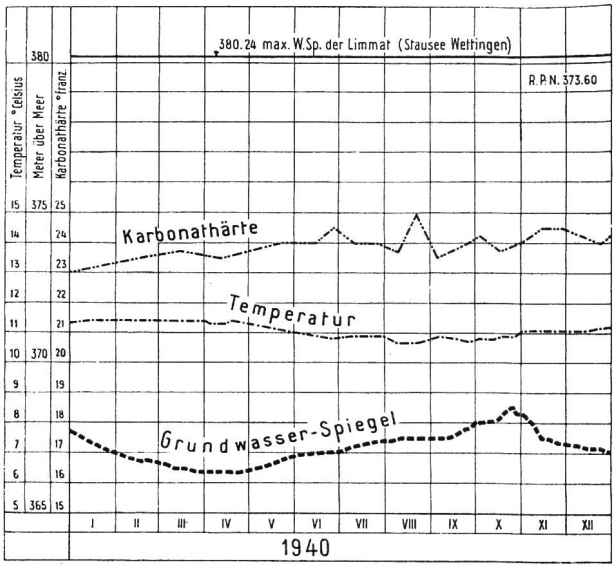

Abb. 5 Darstellung von Spiegelhöhe, Karbonathärte und Temperatur des Grundwassers der Wasserfassung Wettingen für das Jahr 1940.

b) Diese rückläufige Entwicklung der Abdichtung musste wohl deshalb eintreten, weil die Druckänderung im Flussbett schon zehn Monate nach Erreichung der Stauhöhe zur Auswirkung kam, also zu einem Zeitpunkt, als noch keine ausreichend mächtige Kolmatierungsschicht entwickelt war.

c) Auf alle Fälle bringt aber die Episode vom März 1934 den Nachweis, dass die *Beibehaltung der Stauhöhe*, resp. die Konstanz der Druckverhältnisse vom Fluss gegen das Grundwasser die *wichtigste Vorbedingung für die* ungestörte Entwicklung der *Kolmatierung* des Flussbettes darstellt.

8. Die Temperaturschwankungen des Grundwassers der Staustrecke (Abb. 4 und 5)

Die eigenartigen Ergebnisse der Spiegelbeobachtungen beim Grundwasser müssen zunächst die Frage aufwerfen, wie sich die Temperaturen des Grundwassers zu den festgestellten Veränderungen verhalten. Für diese Untersuchungen stehen uns in erster Linie die regelmässigen Messungen in der Wasserfassung der Gemeinde Wettingen (Punkt D) zur Verfügung. Diese Erhebungen sind von der Direktion der Wasserversorgung der Stadt Zürich angeordnet worden.

In Abb. 4 sind zunächst die Temperaturbestimmungen für das Jahr 1933 aufgetragen. Die *vor dem Aufstau* ausgeführten Messungen ergaben Werte zwischen 11,3—12,3° C. Im Januar 1933, d. h. zur *Zeit des Staubeginnes* sinkt aber die Temperatur des Grundwassers rasch auf ein Minimum von 6,9 ° Anfang Mai. Im Laufe des Sommers steigt sie wieder stark an, mit Maximum im August, von 14,4 °. Durch den Stau ist also eine gewisse Annäherung an die Wärmeverhältnisse des Flusswassers eingetreten, sowohl in bezug auf das grosse Ausmass der Schwankungen, als auch auf die zeitliche Verteilung der Extreme, besonders des Sommermaximums. Diese Verhältnisse können natürlich nur eine Folge der Verstärkung der Infiltration im Staugebiet sein, wie wir sie bereits durch die Spiegeländerungen des Grundwassers festgestellt hatten.

Und nun ein unvermittelter Sprung in das Jahr 1940! Die Verhältnisse sind in Abb. 5 zusammengestellt. Aus dieser Zeichnung sehen wir zunächst, wie der Grundwasserspiegel auch hier seit 1933 rapid gefallen ist, wie wir dies bei den Punkten B und C an der Limmat gesehen haben. Bei den Wassertemperaturen hat sich seit dem Jahre 1933 ein scharfer Umschwung vollzogen. Die Messungen ergaben Werte, die zwischen 10,6° und 11,8° C liegen. Wir konstatieren also als wichtigste Kennzeichen der Wassertemperatur: a) Eine relativ grosse Konstanz der Wärme, b) die nur schwach ausgeprägten Extreme sind nahezu um ein halbes Jahr verschoben mit Minimum im August und Maximum im Januar/Februar, c) ein auffallend hoher Wärmewert, der über dem allgemeinen Mittel liegt. Alle diese Merkmale lassen darauf schliessen, dass heute, wie zur Zeit vor dem Aufstau, die Wärme des Grundwassers in erster Linie durch die tiefe Lage des Grundwasserspiegels unter der Terrassenfläche und nicht mehr wie im Jahre 1933 unmittelbar nach dem Aufstau durch die Infiltration von Flusswasser bestimmt wird.

9. Aenderungen der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers

Ueber die chemische Zusammensetzung des Grundwassers geben uns wieder die an der Wasserfassung der Gemeinde Wettingen monatlich ausgeführten Untersuchungen Aufschluss. Auch diese Erhebungen sind von der Direktion der Wasserversorgung Zürich (Direktor Lüscher) angeordnet und vom städtischen Laboratorium Zürich (Vorsteher: Dr. Mohler) durchgeführt worden. Wir verweisen wieder auf die Kurven in Abb. 4 und 5. Für unsere Untersuchungen haben wir nur die Karbonathärte des Grundwassers herausgegriffen, weil diese Komponente der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers sich als sicherstes Kennzeichen zum Nachweise der Beziehungen zwischen Fluss- und Grundwasser erwiesen hat.

Vor Einleitung des Kraftwerkbetriebes ergab sich die Karbonathärte des Grundwassers zu 24—26 franz. Grade. Als Begleiterscheinung des Aufstaues sank der Wert auf 15 Grade, die Vermischung mit infiltriertem, weichem Flusswasser kommt in dieser Aenderung zum Ausdruck. Werfen wir aber einen Blick auf die Härtekurve des Jahres 1940, so konstatieren wir eine vollständige Umstellung der Härteverhältnisse im Sinne einer Annäherung an die Verhältnisse zur Zeit vor dem Aufstau. Auch die Härtekurve lässt also einen starken Rückgang der Infiltration von Flusswasser erkennen.

10. Anhaltspunkte für die Aenderungen der Wassermenge des Grundwasserstromes

Schon auf Seite 81 hatten wir darauf aufmerksam gemacht, dass die Kreuzungsstelle von Limmat und Grundwasserstrom bei Baden-«Aue» die Vorflut für den Grundwasserstrom darstellt. (Punkt E unserer Kartenskizze.) Die durch den Stau vermehrte Grundwasserführung machte die Erstellung einer Grundwasserdrainage an dieser Vorflutstelle notwendig. Diese musste verhindern, dass der Grundwasserspiegel über das frühere Niveau aufsteigen konnte.

Es soll damit natürlich nicht gesagt werden, dass die Grundwasser-Drainage alles Wasser des Grundwasserstromes erfasse. Wenn wir uns vergegenwärtigen, dass der Grundwasserträger noch mindestens 30 m unter das Spiegelniveau herabreicht und ferner kein Zweifel bestehen kann, dass sich die Wasser führende Schotterauffüllung noch mit unverminderter Mächtigkeit weiter talabwärts fortsetzt, so versteht es sich ohne weiteres, dass der Grundwasserstrom sich noch im Ausmasse des vorhandenen Schotterprofiles unter der Limmat hindurch fortsetzen muss. Die Drainage kann nur die über das Niveau der Entwässerung hinaufgehende Komponente abfangen. Oberingenieur Bertschi hat uns das gesamte zugehörige Messmaterial zugestellt.

Die höchste Wassermenge (nahezu 1900 Liter/Sek.) wurde natürlich im Mai 1933, also unmittelbar nachdem die konzessionierte Stauhöhe erreicht war, gemessen. Im Jahre 1934 wurde im August das Sommermaximum noch zu 1750 Liter/Sek. bestimmt. Im August 1935 waren es noch 1400 Liter/Sek. Das Sommermaximum 1942 erreichte nur noch 616 Liter/Sek. Auch die Verfolgung der Wassermengen des Grundwasserstromes ergibt dieselbe Gesetzmässigkeit, wie die anderen Versuchsreihen, auch hier kommt die Verminderung der Infiltration als Folge der fortschreitenden Kolmatierung des Flussbettes in sehr bestimmter Form zum Ausdruck.

11. Materialablagerungen im Staugebiet

Da für die Vorgänge bei der Abdichtung des Flussbettes ohne Zweifel die Ablagerungen einen wichtigen Faktor darstellen, werden einige Angaben über das Mass dieser Alluvionen interessieren. Wir stützen uns dabei auf die durch Oberingenieur Bertschi angeordneten Profilaufnahmen. Seiner Zusammenstellung entnehmen wir folgende Angaben:

In den acht Jahren vom 1. Oktober 1932 bis 1. Oktober 1940 wurden auf der Strecke von der Reppischmündung bis Stauwehr Wettingen, also auf der ganzen Erstreckung des Staues insgesamt 674 000 Kubikmeter Material abgelagert. Aus den Profildarstellungen ergibt sich ferner, dass weitaus der grösste Teil der Ablagerungen auf der Strecke unterhalb des Kessels bei Killwangen abgesetzt worden ist, also gerade auf derjenigen Zone, die für unsere Abdichtungserscheinungen in Betracht kommt. Die Ablagerungen setzen sich hauptsächlich aus feinem Sandmaterial zusammen. Nach den Bestimmungen vom Jahre 1942 wies der Schlamm 97,1 %mineralische Bestandteile auf, die als Abschwemmungsprodukte aus der Molasse des Sihltales aufgefasst werden müssen. Nur der kleine Rest waren organische Bestandteile. In früheren Jahren machten die organischen Bestandteile einen grösseren Prozentsatz aus.

12. Abgrenzung der Abdichtungsstrecke

Bei unseren Untersuchungen über die Kolmatierungserscheinungen des Staugebietes sind wir hauptsächlich von den Feststellungen bei den Beobachtungspunkten B und C zu beiden Seiten der Limmat unmittelbar oberhalb des Stauwehres, sowie von den etwa 1,2 km weiter talaufwärts gelegenen Wasserfassungen Wettingen ausgegangen. Alle Punkte lie-

gen, wie aus unseren Darstellungen hervorgeht, dauernd in der sog. Depressionszone des Staues, d. h. der Grundwasserspiegel steht hier dauernd unter dem Stauspiegel. Das hydrologische Regime wird also durch ein permanentes Sickergefälle vom Fluss gegen das Grundwasser gekennzeichnet. Wir haben uns bis jetzt nicht darüber geäussert, wie weit diese Depressionszone sich flussaufwärts fortsetzt. Schon auf Seite 82 hatten wir darauf aufmerksam gemacht, dass in der Kiesgrube Neuenhof, ca. ein Kilometer oberhalb des Stauwehres anfänglich ein Punkt beobachtet wurde, auch hier stand der Grundwasserspiegel dauernd unter dem Stauniveau. Als weiteren bestimmten Anhaltspunkt haben wir die Wasserfassung im «Kessel» 0,8 km oberhalb der Station Killwangen oder 4,2 km oberhalb des Stauwehres. Wie vor Einleitung des Staues beobachten wir hier den Grundwasserspiegel immer einige Zentimeter *über* dem Stauspiegel. Wir sind mit diesem Punkte bereits aus der Depressionszone herausgekommen, es liegen also normale Vorflutverhältnisse im Sinne eines Druckgefälles vom Grundwasser zum Flusse vor. Bei diesen Verhältnissen kann sich natürlich keine Infiltration von Flusswasser mehr entwickeln. Es kommt dies auch in der Karbonathärte des Grundwassers zum Ausdruck, die immer noch 35 franz. Grade beträgt; es ist dies ein wesentlich grösserer Wert, als wir ihn bei der Wasserfassung Wettingen gefunden haben (ca. 25 Grade). Es muss also, wie wir dies auf Seite 81 für die Zeit vor Einleitung des Staues bewiesen haben, immer noch auf der Strecke unterhalb des «Kessels» Flusswasser zum Grundwasser infiltrieren. Wir konnten diese Erscheinung ganz allgemein an allen Stellen konstatieren, wo der Talgrundwasserstrom mit seinem Spiegel unter das Niveau des Flusses untertaucht. In der Uebergangszone mit ihren vielen Wechseln der Richtung des Sickergefälles kann die Kolmatierung nicht zur Entwicklung kommen. Die Depressionszone des Staugebietes, auf die sich unsere Untersuchungen beziehen, erstreckt sich also vom Stauwehr bis etwa zur Station Killwangen, d. h. auf eine Länge von ca. 4 km.

13. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen über die Abdichtungserscheinungen im Staubecken des Kraftwerkes Wettingen lassen sich in folgende Punkte zusammenfassen:

1. Die Ueberstauung des aus eiszeitlichem Schotter bestehenden Limmattales der Strecke zwischen Killwangen und dem Stauwehr bei Wettingen muss anfänglich eine wesentliche Intensivierung der Infiltration von Flusswasser zur Folge gehabt haben. Die sich daraus ergebende Vermehrung der Wasserführung des Limmattal-Grundwasserstromes äusserte sich durch die folgenden Reaktionen:

a) Im Grundwasserspiegel des Staugebietes macht sich eine starke Erhöhung bemerkbar.

b) Die Temperatur des Grundwassers zeigt eine grössere Jahresschwankung im Sinn einer Annäherung an das Flusswasser.

c) Die Karbonathärte stellt sich infolge des Zuschusses von weichem Flusswasser zum Grundwasser niedriger ein.

d) An der Vorflutstelle in der «Aue» bei Baden kann an der zur Fixierung des Grundwasserspiegels dienenden Drainage eine Vergrösserung der Grundwassermenge festgestellt werden.

2. Die seit dem Zeitpunkte des Aufstaues zu Anfang 1933, also während einer zehnjährigen Periode, ununterbrochen durchgeführten Grundwasseruntersuchungen haben nun aber die folgenden Aenderungen der beschriebenen Infiltrationsverhältnisse des Staugebietes nachweisen lassen:

a) Der Grundwasserspiegel hat sich langsam, aber stetig unter Beibehaltung der normalen Jahreszeitenschwankungen immer tiefer abgesenkt.

b) Das Grundwasser weist eine konstante, relativ hohe Härte und Temperatur auf.

c) Die Karbonathärte hat nach und nach wieder nahezu den gleichen Wert erreicht, der vor Einleitung des Staues bestimmt worden ist.

d) Durch die Grundwasser-Fixierungsdrainage in der «Aue» bei Baden kommt nur noch etwa ein Drittel der im Jahre 1933 bestimmten Wassermenge zum Abfluss.

Alle vier angewendeten Untersuchungsmethoden, die von ganz verschiedenen Funktionen des Grundwassers ausgehen, führen übereinstimmend zu den folgenden hydrologischen Schlussfolgerungen:

a) Die durch die Ueberstauung des ganz aus durchlässigem eiszeitlichem Schotter bestehenden Staugebietes verursachte *Infiltration von Flusswasser* hat sich im Laufe der Zeit *in weitgehendem Masse vermindert.*

b) Dieser Vorgang kann nur dadurch erklärt werden, dass sich das *Staubecken allmählich abgedichtet* hat.

c) Von besonderem Interesse scheint besonders die Feststellung, dass sich das Absinken des Grundwasserspiegels auch in unmittelbarer Nähe des Staugebietes beobachten lässt. Wenn direkt am Limmatufer der Grundwasserspiegel nahezu 17 m unter dem Flußspiegel steht, darf angenommen werden, dass sich das *Grundwasser* hier *vom Flusse vollkommen abgelöst* hat.

Wenn wir nun nach den Ursachen dieses eigenartigen Abdichtungsvorganges fragen, so geben uns

unsere hydrologischen Daten die folgende klare Auskunft:

a) Als wichtiger Faktor für die Abdichtung muss das dauernd *gleichbleibende, vom Flusse zum Grundwasser gerichtete Sickergefälle* genannt werden. Zu dieser Schlussfolgerung berechtigen besonders die Beobachtungen zur Zeit der Senkung des Stauspiegels im Jahre 1934.

b) Der Vorgang wird in weitgehendem Masse durch die *Ablagerung von feinem Material im Staubecken* begünstigt. Wir möchten aber in diesem Zusammenhange darauf hinweisen, dass sich die vollständige Kolmatierung des Flussbettes auch an Flüssen beobachten lässt, die sozusagen keinen Schlamm führen.

Mit der vorstehenden Schilderung des bis in alle Einzelheiten erkennbaren Abdichtungsvorganges im Staugebiet des Kraftwerkes Wettingen glauben wir, einen kleinen Beitrag zur Kenntnis der Hydrologie der Flussgebiete des Mittellandes und damit auch zur Ausnützung der zugehörigen Wasserkräfte geliefert zu haben.

Das Problem der Sanierung des Zürichsees

Von *Heinrich Kuhn,* Dipl.-Ing.

Im Dezember des vergangenen Jahres gingen zahlreiche Aufsätze unter dem Titel «Rettet den Zürichsee» durch die lokale Tagespresse der Seegemeinden. Die Veranlassung zu diesen aufsehenerregenden Artikeln gab die Schrift des zürcherischen Fischerei- und Jagdverwalters Ed. Ammann über «Die Verunreinigung des Zürichsees und die Fischereiwirtschaft». Der Verfasser machte dabei vom fischereiwirtschaftlichen Standpunkt auf die zunehmende Verschmutzung des Zürichsees aufmerksam. Es geht dabei nicht nur um die Erhaltung von 40 Berufsfischern und um den sinkenden Ertrag an Edelfischen, sondern auch um die Frage, ob die Zuleitung der ungereinigten Abwässer aus Haushalt und Gewerbe angesichts der Benützung des Sees zur Trinkwassergewinnung nicht zu einer gesundheitlichen Gefahr werden könnte.

Herr Ammann hat das Verdienst, dass sich die Anwohnerschaft des Zürichsees seit Erscheinen seiner Broschüre in vermehrtem Mass um den Zustand des Zürichsees interessiert. Die in der Broschüre niedergelegten Berichte der Berufsfischer ergeben, dass sich der Seezustand in den letzten drei Jahren verschlechtert hat. Um wieviel, ist dabei eine heikle Frage. Die limnologische Untersuchung des ganzen Sees ergibt kein so ungünstiges Bild wie die Betrachtung des Sees vom Fischerei-Standpunkt aus. Immerhin sind die Tatsachen zu registrieren, dass der Heglig und der Rötel im Zürichsee ausgestorben sind. Der Schwebfelchen kann nur durch die künstliche Erbrütung am Leben erhalten werden, denn die auf den Seegrund absinkenden Felcheneier kommen bei Seetiefen von 80 bis 130 Meter in ein Bett von faulem Schlamm zu liegen, wo sie zugrunde gehen. Ebenso lebensfeindlich ist für zahlreiche Fische die Verschmutzung der Uferpartien, wo die submerse Seehalde durch die Abwässer teilweise als mit einer schleimigen Schlammschicht überzogen erscheint.

Es ist selbstverständlich, dass diese Zustände einer Abhilfe bedürfen, und es ist auch ganz begreiflich, dass die Klagen über die Verschmutzung des Sees manchmal so temperamentvoll vorgetragen werden, dass dabei ein zu düsteres Bild vom Seezustand entworfen wird. Es ist deshalb zu begrüssen, dass Dr. Leo Minder, der langjährige Erforscher und beste Kenner des Zürichsees, anfangs des Jahres 1943 eine Schrift unter dem Titel «Der Zürichsee im Lichte der Seetypenlehre» herausgab, die eine einwandfrei wissenschaftliche Darstellung der See-Entwicklung und des Seezustandes bringt.

Um den Zürichsee in seiner gegenwärtigen Erscheinungsform zu verstehen, ist es nötig, die Seetypen und die Hauptphasen der See-Entwicklung kurz zu erläutern. Der Zürichsee ist ein langgestreckter, tiefer Voralpensee von etwa 40 km Gesamtlänge bei 3,8 km grösster Breite. Die Maximaltiefe beträgt 136 Meter, wobei die mittlere Seetiefe den beträchtlichen Wert von 54 Meter ergibt. Der Moränenwall bei Hurden teilt die Wasserfläche in den Obersee und den Untersee. Der Untersee hat nun in den letzten fünfzig Jahren folgende Entwicklung durchgemacht.

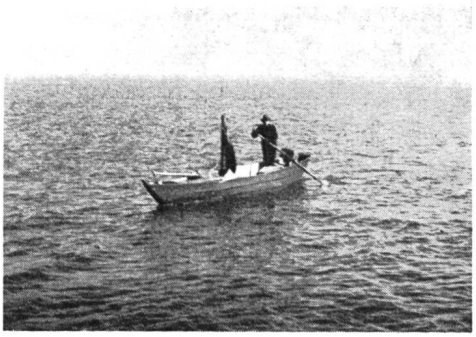

Abb. 1 Eglifang (Rehlig) auf dem Zürichsee bei Richterswil im Frühjahr