Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 30 (1938)
Heft: 9

Artikel: Verladung der Staubecken und Stauhaltungen von Kraftwerken
Autor: Meyer-Peter, E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-922170

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: 09.07.2025

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

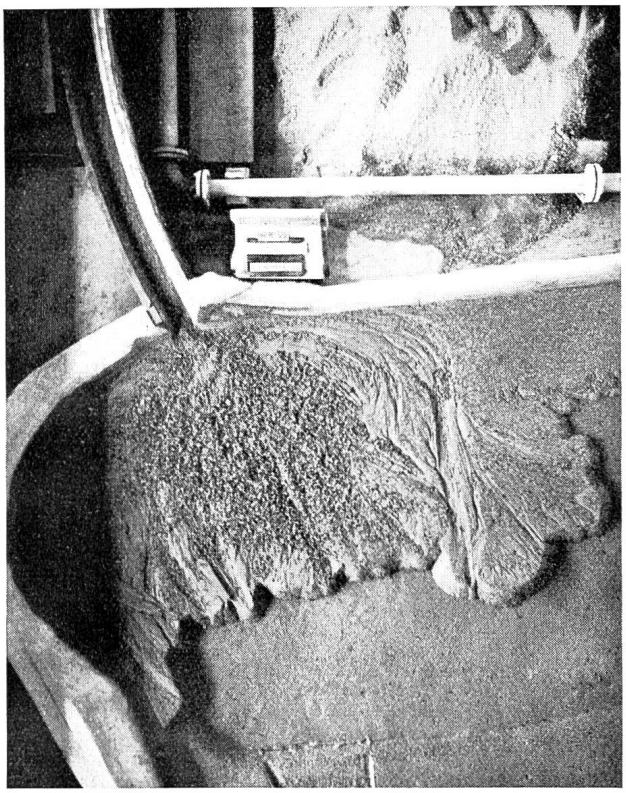

Abb. 89a Verstopfung des Auslaufes.

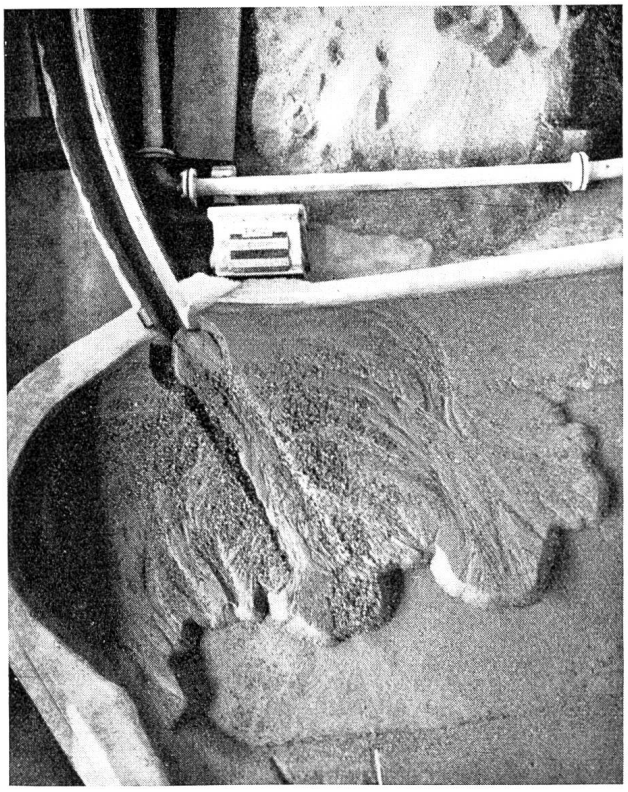

Abb. 89b Durchbruch des Deltas, Räumung des Bachbettes.

Etzelwerk: *Modellversuche über die Einmündung eines Wildbaches in den Sihlsee.*

Verlandung der Staubecken und Stauhaltungen von Kraftwerken

Referat von *Prof. Dr. E. Meyer-Peter*, Zürich, an dem vom S.W.V. und V.S.E. veranstalteten Vortragszyklus vom 2./3. Juni 1938 in Zürich

I. Die Ursachen der Verlandung und der Verlandungsvorgang

1. Die natürlichen Flüsse besitzen die Fähigkeit, ihre Sohle anzugreifen und die losgelösten Teile talwärts zu fördern. Diese Schwemmstofführung erfolgt auf zwei Arten. Feine Korngrössen der mitgeschleppten Mineralien können in schwebendem Zustand fortgeführt werden, das sind die *Sinkstoffe* oder *suspendierten Materialien*, die meistens als Schlamm bezeichnet werden. Gröbere Korngrössen werden am Flussboden rollend oder auch sprungweise sich bewegend transportiert, das sind die *Gerölle* oder *Geschiebe*.

Frägt man nach der auf die Sohle wirkenden Kraft, die ein Loslösen und Hochheben von Körpern bewirkt, die spezifisch schwerer sind als Wasser, so kommt man zu der aus der Hydraulik bekannten Tatsache, dass fliessendes Wasser auf die Wandung des Gerinnes eine Scherkraft ausübt, die nach dem Gesetze von actio und reactio gleich sein muss der das Wasser bremsenden Kraft (Reibungskraft), welch letztere aber gleich ist dem Gewicht des Wassers multipliziert mit dem Energieliniengefälle. Die auf die Flächeneinheit der Sohle wirkende spezifische Scherspannung ist also bei einem sehr breit gedachten Gerinne durch den Ausdruck:

$$S = \gamma \cdot h \cdot J_e \text{ in } t/m^2 \qquad (1)$$

gegeben, wenn γ das spezifische Gewicht des Wassers (t/m), h die Wassertiefe (m) und J_e das Energieliniengefälle bedeuten. Diese Scherspannung wird auch als *Schleppkraft* bezeichnet. Besteht die Sohle aus festem Gestein, so wird die Schleppkraft einen gewissen Mindestbetrag annehmen müssen, um eine merkbare Ablösung von Teilchen aus der Sohle hervorzubringen. Dieser «Grenzwert der Schleppkraft» hängt von den Festigkeitseigenschaften des Gesteins ab. Ebenso wird auch bei Lockergesteinen (Kies, Sand, Lehm, etc.) ein solcher Schleppkraft-Grenzwert erreicht sein müssen, um Einzelbestandteile der Sohle in Bewegung zu setzen. Seine Grösse wird vom Korndurchmesser der Bestandteile abhängen. Bei kohärenten Lockergesteinen wird wiederum der Grad der Kohäsion massgebend sein.

So einleuchtend diese Ueberlegungen auch sein mögen, so ist es bis heute doch nicht gelungen, in der Natur brauchbare Werte für diese Grenz-

schleppkraft durch Messungen zu finden, auch nicht für den einfachsten Fall der kohäsionslosen Kiessande. Laboratoriumsversuche zeigen, dass, im Gegensatz zur Gleichung (1), das Produkt aus Wassertiefe mal Energieliniengefälle bei einer und derselben Korngrösse verschiedene Grenzwerte annimmt, wenn einer der beiden Faktoren variert wird. Es müssen also noch andere Faktoren mitwirken, die bisher theoretisch nicht erfasst sind.

Noch weniger befriedigen die auf Grund des Schleppkraftbegriffes theoretisch abgeleiteten Ansätze für die Geschiebemenge einer gegebenen Korngrösse, wie z. B. das Gesetz von Dubuat.

2. Transport und Ablagerung von Sinkstoffen (suspendiertes Material, Schlamm)

Die Fähigkeit des fliessenden Wassers, spezifisch schwerere Bestandteile im schwebenden Zustand mitzuschleppen, beruht auf der Turbulenz des Fliessvorganges. Die einzelnen Wasserteilchen besitzen ausser der Geschwindigkeitskomponente in der Hauptfliessrichtung zeitlich veränderliche Geschwindigkeitskomponenten, von denen die senkrecht nach oben gerichteten Vektoren die infolge der Schwere zu sinken bestrebten Sinkstoffteilchen immer wieder in die Höhe befördern. Der Grad dieser Schleppfähigkeit muss also von der Fliessgeschwindigkeit und der Rauhigkeit der Sohle abhängig sein. Inwieweit die Wassertiefe eine Rolle spielt, soll später besprochen werden.

Zur Ausnützung der Wasserkraft ist die Konzentration des von der Natur in der Konzessionsstrecke zur Verfügung gestellten Gefälles erforderlich. Die Gefällskonzentration ist so zu verstehen, dass das Wasser, welches beim natürlichen Fluss seine am obern Ende vorhandene potentielle Energie in Reibungsarbeit, also in Wärme umsetzt, veranlasst wird, die Konzessionsstrecke mit möglichst geringer Energieverschwendung zu durchlaufen. Dann wird an einem bestimmten Punkt der Strecke, dem Maschinenhaus, noch ein möglichst grosser Anteil der Gesamtenergie für die Umwandlung in elektrische Energie zur Verfügung stehen. Dieser nicht verbrauchte Energieanteil wird durch das Nettogefälle ausgedrückt.

a) Niederdruckwerke.

Die Gefällseinsparung kann erfolgen:

1. durch *Verminderung der Fliessgeschwindigkeit;* dazu ist aber eine Vergrösserung des Durchflussquerschnittes erforderlich, was durch *Einstau des Flusses* erreicht wird, gleichzeitig wird auch der Profilradius vergrössert, was im gleichen Sinne wirkt;

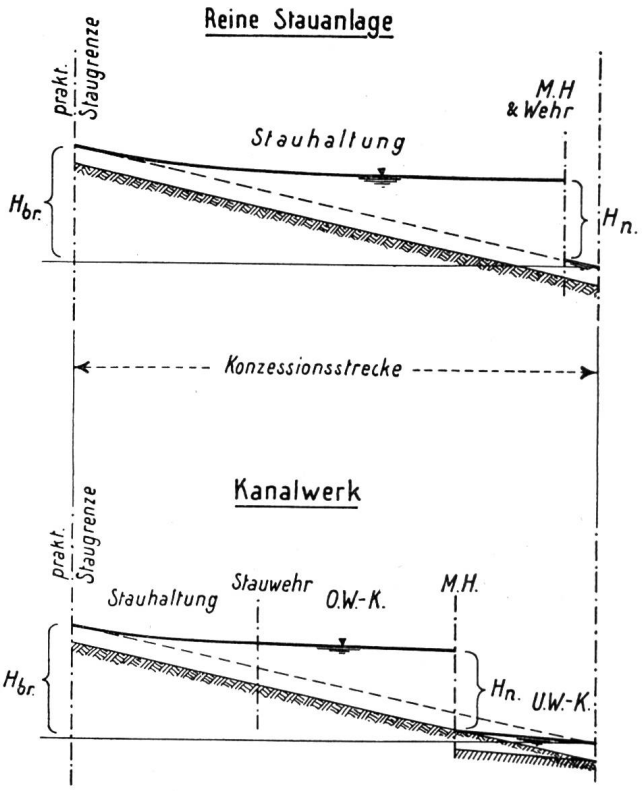

Abb. 90 Gefällskonzentration bei reinen Stauanlagen und Kanalwerken.

2. durch *Verminderung der Rauhigkeit,* wozu erforderlich wird, das Wasser in einen *Seitenkanal abzuleiten.*

Reine Stauanlagen sind solche, bei denen das erste Mittel verwendet wird (Abb. 90, oben).

Kanalwerke weisen eine Kombination beider Mittel auf (Abb. 90, unten).

Die Verminderung der Fliessgeschwindigkeit im Staugebiet einer Anlage hat nun auf Grund des oben über die Schleppfähigkeit für suspendiertes Material Gesagten eine Herabminderung des Schleppvermögens zur Folge. Der mitgeführte Schlamm wird sich, nach Massgabe der Verminderung der Fliessgeschwindigkeit, auf der Sohle der Staustrecke absetzen. Er kann dort eine Zeitlang als feines rollendes Geschiebe noch weiter befördert werden, bis auch diese Beförderungsart schliesslich aufhört.

Um einen Begriff von diesem Vorgang zu geben, seien die Resultate von Laboratoriumsversuchen, die die Versuchsanstalt für Wasserbau im Auftrage des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft und der Rheinbauleitung Rorschach auszuführen hatte[1], besprochen.

In einem Versuchsgerinne wurde bei anfänglich grosser Wassergeschwindigkeit dem Wasser eine

[1] «Wasserführung, Sinkstofführung und Schlammablagerung des alten Rheins». Mitteilung Nr. 31 des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft 1932.

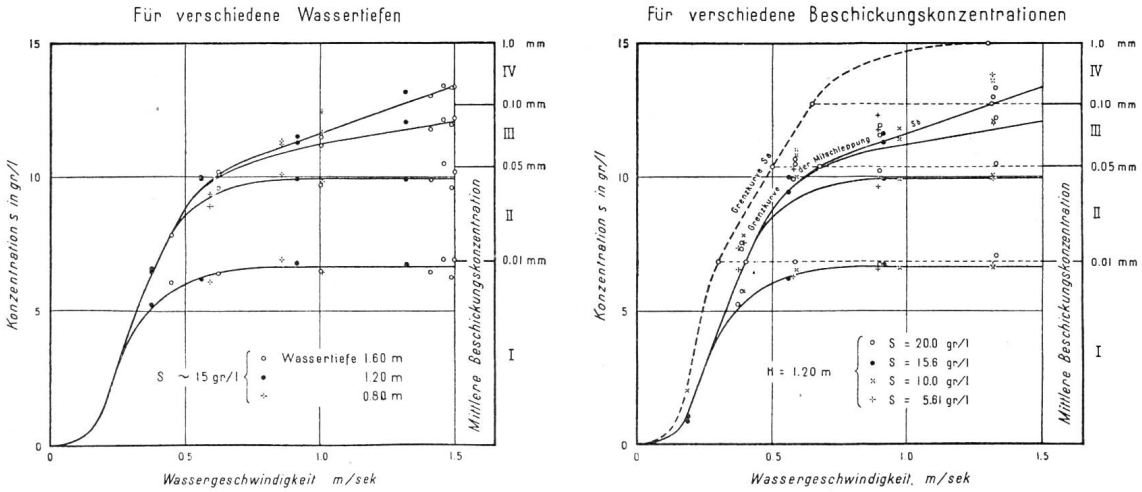

Abb. 91 a und b Schleppvermögen beim Beharrungszustand in Funktion der mittleren Wassergeschwindigkeit in der Versuchsstrecke. (Alle Konzentrationen reduziert auf eine Anfangskonzentration von 15 gr/Liter).

bestimmte Schlammenge zugefügt. Die pro Liter Wasser anfänglich mitgeschleppte Schlammenge, die sog. «Konzentration», varierte bei den Versuchen zwischen 5 und 20 gr/lt. Die Schlammenge bestand aus einem natürlichen Korngemisch in den Grössen von 0—1 mm. Es wurde untersucht, welche Korngrössen mit abnehmender Fliessgeschwindigkeit noch suspendiert mitgeschleppt werden, und zwar in Abhängigkeit von der Wassertiefe, die bei den Versuchen von 0,8—1,6 m varierte.

Abb. 91 a zeigt, dass die Grenzgeschwindigkeit für das Ausfallen bestimmter Kornkategorien innerhalb der Versuchsgrenzen unabhängig ist von der Wassertiefe.

Abb. 91b zeigt anderseits, dass die Grenzgeschwindigkeit auch unabhängig ist von der ursprünglichen Schlammkonzentration.

Aus den Versuchen geht hervor, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Wasserführung eines Flusses und der gleichzeitigen Schlammführung besteht, dass das Wasser vielmehr innert weiter Grenzen beliebige Schlammengen suspendiert zu transportieren vermag, wobei aber die Korngrösse eine Funktion der Geschwindigkeit ist. Das erstere Laboratoriumsergebnis wird weitgehend durch Messungen in der Natur bestätigt. Die grösste Schlammkonzentration am Rhein oberhalb des Bodensees, der bekanntlich sehr viel Schwemmstoffe führt, wurde zu 52,1 gr/lt. gemessen[1], und zwar 1911, bei einer Wasserführung von rd. 1065 m³/sec, 1910 betrug sie bei 2650 m³/sec nur 28,9 gr/lt. Nach Nesper[1] betrug sie für eine Abfluss von 1500 m³/sec 13 gr/lt. am 5. Oktober 1935, und für den fast gleichen Abfluss am 29. Juli 1936 nur 9,7 gr/lt.

Wie gestaltet sich nun die Ablagerung in der Staustrecke?

Nach Abb. 91 müssen sich mit abnehmender Fliessgeschwindigkeit, also mit zunehmender Stauhöhe gegen das Stauwehr, zuerst die gröberen Schlammkörper ablagern, bis schliesslich selbst die feinsten nur noch unvollständig abtransportiert werden können.

Als Beispiel für diesen Ablagerungsvorgang soll das Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt herangezogen werden.

Abb. 92 lehrt zunächst, dass die Ablagerungen mit zunehmendem Stau, also flussabwärts gegen das Stauwehr, zunehmen. Die seit der Betriebseröffnung 1930 bis zum Jahr 1933 erfolgte totale Schlammablagerung betrug 1,500,000 m³.

[1] Ph. Krapf: «Die Schwemmstofführung des Rheins». Wien 1919.

[1] «Die internationale Rheinregulierung von der Illmündung bis zum Bodensee». Schweiz. Bauzeitung Nr. 12 bis 15, Sept./Okt. 1937.

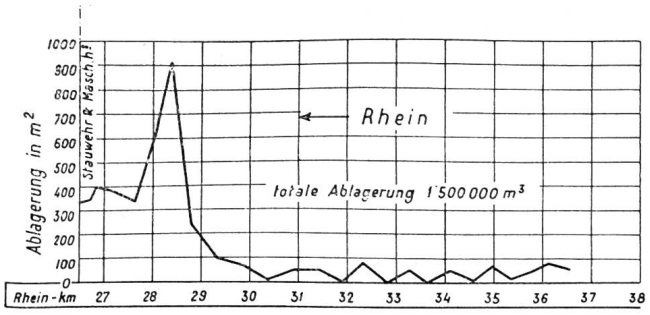

Abb. 92 Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt. Verteilung der Schlammablagerungen im Staugebiet.

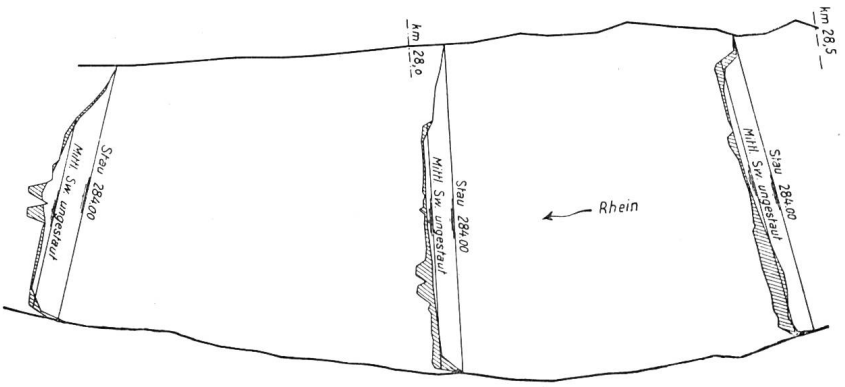

Abb. 93 Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt. Verlandung der Sohle im Stauraum.

Frägt man nach den Orten, welche von der ersten Ablagerung vorgezogen werden, so sind es, wie aus den Querprofilen der Abb. 93 hervorgeht, zunächst die lokalen Austiefungen der ursprünglichen Flußsohle, sodann typische Verbreiterungen des Flußschlauches. Beide Erscheinungen erklären sich leicht durch die Tatsache, dass bei scharfen Profilerweiterungen (nach der Tiefe oder nach der Breite) Wasserwalzen entstehen, die infolge örtlicher Verminderung der Geschwindigkeit das Ausfallen der Schlammteilchen begünstigen.

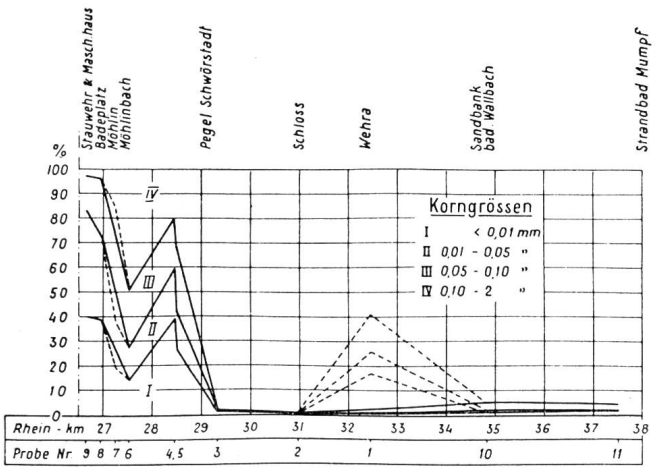

Abb. 94 Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt. Geschiebeband der Ablagerungen.

Interessant ist vor allem das aus Abbildung 94 ersichtliche «Geschiebeband», das die in den einzelnen Querprofilen abgelagerten Schlammkörner verschiedener Korngrössen-Kategorien nach ihrem prozentualen Anteil an der Gesamtmenge darstellt. Hier sieht man die praktische Auswirkung der durch die Laboratoriumsversuche festgestellten Grenzwerte des Schleppvermögens (Abb. 91).

b) Grosse Staubecken im Hochgebirge.

Es bedarf keiner weiteren Erläuterungen dafür, dass sämtliche Schwemmstoffe im Stausee abgelagert werden müssen. Es handelt sich hier um einen Vorgang, der demjenigen der Deltabildung in natürlichen Seen durchaus analog ist. Deltavermessungen in der Schweiz sind vom Eidgenössischen Amt für Wasserwirtschaft an mehreren Seen ausgeführt worden.

Im wesentlichen kommt es hier auf die mittlere Schlammkonzentration der einmündenden Gebirgs- und Gletscherbäche an. Hierüber bestehen leider noch wenige Messungen. Für den Rhein bei seiner Mündung in den Bodensee ergibt sich aus den Deltavermessungen des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft ein Betrag von rd. 3 Millionen m^3, d. h. etwa 3,9 Millionen t pro Jahr, also pro km^2 des 6000 km^2 messenden Einzugsgebietes rd. 500 m^3/km^2/Jahr, das macht etwa 650 t/km^2/Jahr. Da die mittlere Jahreswasserfracht etwa 7 Milliarden m^3 beträgt, kommt man auf eine mittlere Schlammkonzentration von

$$s = \text{rd. } 0{,}6 \text{ gr/lt.}$$

Durch die bereits erwähnten Messungen von Nesper wurde im Jahre 1935 eine mittlere Schlammkonzentration von 1,3 gr/lt., im Jahre 1936 eine solche von 0,63 gr/lt. ermittelt.

Diese Zahlen finden eine Ergänzung in den neuesten Messungen des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft an der Aare bei Brienzwiler. Die mittlere Schlammkonzentration betrug für das Jahr 1936 0,18 gr./lt. und für 1937 0,26 gr/lt. Zieht man die in den beiden Stauseen des Kraftwerkes Handegg gefassten Wassermengen von derjenigen bei Brienzwiler ab, so ergeben sich die immer noch sehr geringen mittleren Konzentrationen von 0,23 bzw. 0,34 gr/lt. Collet bestimmte im Sommer 1916 (Juni bis August) die mittlere Schlammkonzentration des Abflusses des Schwarzenberggletschers (Mattmarkgebiet) zu rd. 1 gr/lt.[1] Es wird vorsichtig sein, im Hochgebirge mit durchschnittlich 1 gr/lt. zu rechnen, ausserordentlich günstige geologische Bedingungen vorbehalten.

[1] O. Lütschg: «Ueber Niederschlags- und Abflussverhältnisse im Hochgebirge». Schweiz. Wasserwirtschafts-Verband 1926.

Grosse Speicheranlagen haben einen Stauraminhalt V_0, der, je nach dem Zweck des Speichers, in einem bestimmten Verhältnis zur totalen Jahreswasserfracht steht.

$$\text{Es sei } \frac{V_0}{V} = \eta$$

Dieser Wert η wird bekanntlich für sogen. Jahresspeicher, d. h. für Anlagen, die konstante Jahresenergie abzugeben haben, etwa den Wert 0,45 haben, während ein sogenannter Winterspeicher zum Zwecke der ausschliesslichen Energieabgabe im Winter im Hochgebirge einen Wert η = rd. 0,95 aufweisen wird.

Bei bekannter mittlerer Schlammkonzentration s und vorgeschriebenem Verhältnis η lässt sich nun die Zeitdauer T bis zur vollständigen Verlandung des Speicherraumes ohne weiteres berechnen nach der Beziehung:

$$T = \eta \cdot \frac{\gamma_e}{s} \text{ in Jahren}$$

Dabei bedeutet γ_e das Trockengewicht eines m³ abgelagerten Schlammes, die Konzentration ergibt sich mit s = 0,001 t/m³ und

$$\gamma_e = 1{,}3 \text{ t/m}^3$$

für einen Jahresspeicher mit η = 0,45

T = rd. 290 Jahre

für einen Winterspeicher mit η = 0,95

T = rd. 620 Jahre

Tages- und Wochenspeicher haben anderseits, wenn nicht besondere Vorkehrungen zur Verhinderung der Stauraumverlandung getroffen werden, eine Lebensdauer von nur wenigen Jahren.

3. *Transport und Ablagerung von Geschieben*

Bei der Besprechung des Schlammtransportes wurde gezeigt, dass die Schlammkonzentration innert weiter Grenzen ohne Einfluss auf die Schleppbarkeit bestimmter Korngrössen ist. Ganz anders verhält es sich beim Geschiebetransport, wo eine sog. *Geschiebefunktion,* d. h. ein Zusammenhang zwischen Wassermenge, Gefälle, Korngrösse und transportierbarer Geschiebemenge besteht.

Wie erwähnt, haben die Versuche, die Schleppkraft als massgebenden Faktor für die Geschiebeführung einzuführen, nicht zum Ziele geführt. Von den neuern Arbeiten auf diesem Gebiete seien nur diejenigen der Versuchsanstalt für Wasserbau an der E. T. H. erwähnt, die zu der folgenden Beziehung geführt haben.[1]

$$q^{2/3} \cdot J_e = a\,d + b\,g^{2/3} \qquad (3)$$

Hierin bedeuten:

q die pro Meter Flussbreite fliessende Wassermenge in kg/m sec.

g die pro Meter Flussbreite laufende Geschiebemenge in kg/m sec.

d den Korndurchmesser bei einheitlicher Korngrösse bzw. den «massgebenden» Durchmesser bei Geschiebegemischen in m.

J_e das Energieliniengefälle

a und b sind Konstante, die vom spezifischen Gewicht und der Form der Geschiebe abhängen.

Bei normalem Flussgeschiebe mit einem mittleren spezifischen Gewicht von etwa 2,65 und gut abgerundeter Form, wie sie sich bei grossen Transportweiten im Mittel ergibt, können diese zwei Konstanten mit den Werten a = 17, b = 0,4 eingeführt werden.

Die Anwendbarkeit der Formel (3) ist auf Flüsse, die sich in ihrer eigenen Alluvion bewegen, zu beschränken. Darunter ist ein Fluss zu verstehen, der seine heutige Sohle durch allmähliche Geschiebeablagerung selbst gebildet und so lange erhöht hat, bis er einen Gleichgewichtszustand erreicht hat. So ist durch Messungen in der Natur nachgewiesen, dass die auf Grund von Gleichung (3) bestimmten jährlichen Geschiebefrachten des Rheins oberhalb des Bodensees mit den tatsächlichen Frachten sehr gut übereinstimmen.[1]

Die Gleichung (3), die für einen durch Alluvion gebildeten Gleichgewichtszustand gilt, ist nicht ohne weiteres anwendbar für eine Flußsohle, die durch allmähliche Erosion des Flusses in frühere Ablagerungen, die unter andern hydrographischen Verhältnissen als den heutigen gebildet wurden, entstanden ist. Dies wäre beispielsweise der Fall für einen in eiszeitlichen Terrassenschotter eingebetteten Flusslauf. Durch die allmähliche Erosion in diesen Schotter wurde die Flußsohle mit groben Kieseln «angereichert»; die Sohle ist grob abgepflästert. Als Beispiel für diesen Zustand seien die langen, in Niederterrassenschotter gelegenen Rheinstrecken zwischen Basel und dem Rheinfall, oder dann die Rhone zwischen der Mündung der Arve und der Landesgrenze erwähnt. Für solche Flüsse gibt die Gleichung (3) einen möglichen Maximaltransport für grosse Wasermengen, wobei aber die Sohle bei kleineren und mittleren Wassermengen auch bei kleineren Geschiebeführungen als nach Gleichung (3) im Gleichgewichte bleibt. (Fortsetzung folgt.)

[1] «Neuere Versuchsresultate über den Geschiebetrieb». Schweiz. Bauzeitung vom 31. III. 1934.

«Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen». Schweiz. Bauzeitung, März 1935.

[1] «Die internationale Rheinregulierung von der Illmündung bis zum Bodensee». Schweiz. Bauzeitung, Jahrgang 1937, Bd. 109, Nr. 16—18 und Bd. 110, Nr. 12—15.