

Über die Auswertung der Schwebstoffmessungen in Flussläufen

Cevat ERKEK ¹

Ö Z E T

Akarsularda askı halinde taşınan katı maddelerin büyüklüğü hakkında değişik görüşler mevcuttur. Katı maddelerin baraj haznelerini beklenenden çabuk doldurması çok yönlü araştırmalara vesile olmaktadır.

Bugün akarsularda taşınan askı madde miktarını, direkt ölçmeler yapılmadan hesap etmek henüz mümkün değildir. Taşınan askı madde miktarı ile debi arasında bağıntı kurmak için, şimdiye kadar yapılan denemeler neticesiz kalmıştır.

Bu çalışmada, akarsularda ölçülen askı madde miktarları sayılar kolektifi olarak ele alınmış ve istatistiki metotla değerlendirilmiştir. Netice olarak askı halinde taşınan katı maddeler ile debi arasındaki bağıntı, logaritmik ölçekli koordinat sisteminde bir doğru ile gösterilmiştir.

KURZFASSUNG

Über das Ausmass der Schwebstoffführung der Flüsse gingen die Ansichten weit auseinander. Unerwartet rasche Stauraumverlandungen durch das Feststofftrieb gaben anlass zu vielseitigen Untersuchungen.

Heute es ist noch nicht möglich, für Flüsse, von denen keine unmittelbaren Schwebstoffmessungen vorliegen, die Berechnung der Schwebstoffführung durchzuführen. Die bisherigen Versuche unmittelbare Beziehung zwieschen der Schwebstoffführung und dem Abluss herzustellen scheiterten.

¹ Dr. - Ing., Privatdozent am Lehrstuhl für Wasserbau,
Technische Universität Istanbul.

In dieser Arbeit werden die Schwebstoffbeobachtungswerte in den fließenden Gewässern als Mischkollektive der grossen Zahl betrachtet und mit einer statistischen Methode ausgewertet. Als Ergebnis, konnte die Beziehung zwischen Schwebstofftrieb und Abfluss im doppelt logarithmischen Koordinatensystem durch eine Gerade dargestellt werden.

1. Allgemeines

Die Verlandung der Stauräume in den Feststoffführenden Flüssen ist weniger auf das Geschiebe, als vielmehr auf die Schwebstoffe zurückzuführen. Nach den Verhältnissen der türkischen Flüsse musste Geschiebe- und Schwebstofffracht ein Verhältnis 1:3 sogar bei einigen Flüssen 1:5 haben. Das Ausmass und die besonderen Eigenschaften der Schwebstoffführung zu ergründen, ist deshalb von zwingender Notwendigkeit.

Die Schwebstoffe entstehen durch Erosionswirkung der Niederschläge in dem Einzugsgebiet, und gelangen durch Vorfluter in den eigentlichen Flusslauf. Sie stammen auch zum Teil aus der Zerkleinerung des Geschiebes (Abrieb) und aus Ufer- und Sohlenauswaschungen, wobei die Erosionswirkung der Niederschläge im Einzugsgebiet für die Schwebstoffführung eine weit wichtigere Rolle spielt als die letzteren.

Danach ist die Grösse des Schwebstofftransportes in einem Fluss neben der Wasserführung und Turbulenz von der Bodenbedeckung und Bodenart sowie von Grösse, Form und Oberflächengefälle des Einzugsgebietes abhängig. Neben diesen Hauptfaktoren wird der Schwebstofftransport in einem Fluss durch klimatische Einflüsse und jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge beeinflusst. Die Schwebstoffe wandern sofort nach ihrer Entstehung mit der Geschwindigkeit des umgebenden Wassers weiter.

Eine theoretische Begründung des Schwebstofftransportes in Suspension ist sehr schwierig und nur bedingt möglich, weil bei der Aufstellung die gesetzmässigen Zusammenhänge der genannten zahlreichen Faktoren verschiedenen Ursprungs, analytisch sehr schwer behandelt werden können. Es ist wichtig hervorzuheben, dass die hydraulischen Grössen des Flusses auf die Grösse der Schwebstoffführung keinen entscheidenden Einfluss haben. Entscheidend sind vielmehr die Schwebstoffmengen, die das Einzugsgebiet des Flusses oberhalb des Messquerschnittes zu liefern vermögen. Deshalb ist man gezwungen, durch lückenhafte direkte Schwebstoffmessungen, die über längere Zeiträume ausgedehnt werden sollten, Gesetzmässigkeiten in den Flussläufen abzuleiten.

2. Ermittlung des Schwebstoffgehaltes in Flussläufen

Zur Messung der Schwebstoffbelastung (kg/m^3) in Flussläufen wird eine bestimmte Wassermenge (z. B. 1 lt.) in der gewünschten Tiefe oder aus der Oberfläche im Stromstrich mit einem Schöpfgefäß entnommen. Die entnommenen Wasserproben werden zunächst gesiebt um Rückstände von $d \geq 0,6 \text{ mm}$ abzuscheiden. Der Rest wird mit papierfiltern filtriert und der Filtrerrückstand nach Trocknung des Filters im Exsikkator bei 105°C gewogen.

Die feinsten Körner werden durch die Filterporen entweichen, der auf andere Weise (z. B. photoelektrischen wege) erfasst werden muss. Man kann auch der Abdampfrückstand der filtrierten und nicht filtrierten Proben bei 105°C getrennt ermitteln und von der Gesamtmenge der Glührückstand durch Veraschung organische Anteil bestimmt werden kann.

Mit Hilfe des Abflusses werden für den Gesamtrückstand, den filtrierten Abdampfrückstand (Filterdurchgang) und für die Differenzmenge (Filtrerrückstand), die Ganglinien und die Frachten der schwebenden und gelösten Stoffe ermittelt.

3. Verteilung von Schwebstoffen über den Flussquerschnitt

In einer turbulenten Strömung transportierten Schwebstoffe kann man mit Hilfe der Diffusionsgleichung beschreiben und die Schwebstoffverteilung in einem Querschnitt ermitteln. Durch eine wasserspiegelparallele Ebene absinkende Schwebstoffmenge ($c \cdot w$) ist gleich dem Schwebstofftransport infolge des Konzentrationsgradienten gesetzt, ergibt sich die Diffusionsgleichung in dem form [6, 10]

$$c_z \cdot w + \epsilon_z \cdot \frac{dc}{dz} = 0 \quad (1)$$

Wobei bedeuten

w = Sinkgeschwindigkeit der suspendierten Partikel im Wasser
(m/s)

c_z = Konsentration in einem beliebigen Punkt im Abstand z über der Flussole (kg m^3)

ϵ_z = Diffusionskoeffizient der Suspension

$\frac{dc}{dz}$ = Konzentrationsgradienten

Diffusionskoeffizient kann proportional dem turbulenten Austausch-
koeffizienten gesetzt werden, damit erhält man

$$\epsilon_z = \beta \cdot \epsilon = \beta \cdot \frac{\tau}{\rho \cdot \frac{dv}{dz}} = \beta \cdot K \cdot v_* \cdot \left(\frac{h-z}{h} \right) \cdot z \quad (2)$$

Theoretische und experimentelle Untersuchungen führten schliess-
lich für zweidimensionalen Abfluss für die Suspensionsverteilung in
Abhängigkeit von der Wassertiefe zur folgenden Gleichung

$$\frac{c_z}{c_a} = \left[\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^\alpha \quad (3)$$

wobei bedeuten

c_a = Konzentration im Abstand a von der Gerinnesohle ($z=a$)

$$\alpha = \frac{w}{\beta \cdot K \cdot v_*}$$

$$\beta = \frac{\alpha_{\text{gerechnet}}}{\alpha_{\text{gemessen}}}, \quad (\beta=1)$$

K = von Kármán-Konstante, ($K=0,4$ für Reinwasser, $K=0,21$ für
Suspension, $c=15,8$ g/l)

v_* = Schubspannungsgeschwindigkeit $\left(v_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \right)$

Als Ergebniss, der hier kurz angedeuteten Gleichungen kann gesagt
werden, dass man heute nicht in der Lage, für Flüsse, von denen keine
Schwebstoffmessungen vorliegen, die Verteilung von Schwebstoffen über
den Flussquerschnitt, damit die Berechnung des Schwebstofftransportes
durchzuführen. Ausserdem erhält man durch Anwendung der Gleichung
(3) in unmittelbarer Sohlennähe unendlich grosse Konzentrationen was
als nachteilig empfunden werden muss.

4. Mathematisch - statistisches Verfahren

In einem Flusslauf muss die Schwebstoffführung auf längere
Zeiträume beobachtet und gemessen werden, um daraus Gesetzmässig-
keiten abzuleiten bzw. aufzustellen. Wenn man alle Messergebnisse des

Beobachtungszeitraumes im doppelt logarithmischen System in Abhängigkeit von der jeweiligen Wasserführung aufträgt, so erhält man eine Punktwolke. Die Streuung der einzelnen Messwerte erschwert die Auswertung. Zwar wächst die Schwebstoffführung im allgemeinen mit der Wasserführung des Flusses, trotzdem erschweren die beträchtliche Streuungen um bestimmte Gesetzmäßigkeiten zu erkennen.

Man kann zwar zwischen Abfluss und Schwebstoffführung eine Schwerlinie einzeichnen, aber die Grösse Streuung macht es störend bemerkbar und besonders im Bereich höherer Werte, einlegen einer Tendenzlinie bringt grössere Unsicherheiten. Um den Zeitraum der Schwebstoffmessungen zu kürzen und eine Beziehung zwischen der Schwebstofftrieb und Abfluss zu finden, ist man in der Lage, das Gesetz der grossen Zahl das heisst Methode der mathematischen Statistik anzuwenden. [1, 3, 4].

Das Prinzip des Verfahrens beruht darauf, dass der gesamte Abflussbereich eines Flusses in bestimmte Intervallbereiche unterteilt wird. Die Grenzen der einzelnen Intervallbereiche sind so festgelegt, dass in den einzelnen Gruppen annähernd eine gleiche Anzahl von Schwebstoffmessungen vorhanden ist. Nach Festlegung der Abflussgruppen werden in jeder Gruppe vorkommende Schwebstoffmesswerte der Grösse nach eingeordnet und in mehrere «Klassen» unterteilt. Die Unterteilung in Klassen wird so vorgenommen, dass die Logarithmus der in ihnen vorkommenden Schwebstoffmessungen in einen konstanten Intervallbereich fällt; die einzelnen Klassenbreiten einer Abflussgruppe sind demzufolge gleich gross. Nach der Auszählung der Messwerte jeder Klasse wird die Häufigkeit der einzelnen Klassen durch Dividieren der Anzahl der Messwerte der Klasse durch die Gesamtmesszahl ermittelt.

Rémy nimmt für die weitere Entwicklung des Verfahrens an, dass die Schwankungen des Schwebstofftriebes statistisch nach Gauss verteilt sind und verwendet das Fechner'sche Prinzip mit dem Normalverteilungsgesetz. Es wird ein Häufigkeitspolygon in ein kartesisches Koordinatensystem gezeichnet. Als Ordinate wird die relative Häufigkeit mit linearer Verteilung und als Abszisse der Logarithmus der Klassenbreite eingetragen. Über den Klassenbreiten werden der Merkmalsgrössen g , (kg s) in Erscheinung treten. Dieses Stufenpolygon wird durch Normalverteilungskurven von Gauss derart ausgeglichen, dass die von der Normalverteilungskurve und der Abszisse eingeschlossene Fläche gleich der Fläche des Stufenpolygons ist. Der gesamte mittlere Schwebstoff-

trieb einer Abflussgruppe wird dann als Summeninhalt der einzelnen Gausskurven ermittelt.

In folgenden sollen für die Auswertung der Messwerte erforderliche Schritte nochmals kurz zusammengefasst werden

- a — Die gesamten Schwebstoffmesswerte werden nach der Abfluss in Gruppen geteilt (z. B. $Q_n - Q_{n-1}$, $Q_{n-1} - Q_{n-2}$, ... u.s.w)
- b — Innerhalb der einzelnen Abflussgruppen werden Schwebstoffmesswerte nach dem Logarithmus in Klassen mit gleicher Breite eingeteilt.
z. B. Abflussgruppe: $Q_n - Q_{n-1}$ wird in 10 Klassen mit der konstanten Klassenbreite ($\Delta x = \Delta \log . g$, = const.) geteilt.
($x = \log . g$)
- c — Für jede Klasse werden relativen Klassenhäufigkeiten durch auszählung der Messwerte bestimmt.

$$P_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \cdot 1000$$

N_i = Die Anzahl der Messwerte der Klasse i ist.

- d — Mit Hilfe der Klassenbreite (Δx) und der relativen Klassenhäufigkeiten (p_i) werden das Stufenpolygon (Histogram) gezeichnet. (Abb. 1)
- e — Die Stufenpolygone werden durch die erforderliche Anzahl der Gauss'schen Normalverteilungskurven als Summenfunktionen ausgeglichen. (Abb. 1)

Die Form der Gauss'schen Verteilungsfunktion :

$$f(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-x_m)^2}{2S_x^2}} \quad (4)$$

Wobei bedeutet

A = Das Scheitelwertordinate von $f(x)$ in $(0, x_0)$

x = Die Abszisse von $f(x)$,

x_m = Die Abszisse des Scheitelwertes,

S_x = Die Streuung von $f(x)$

Die Fläche unter der Gauss'schen Verteilungskurve ergibt sich

$$A \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x_m)^2}{2S_x^2}} \cdot dx = A \cdot S_x \cdot \sqrt{2\pi} \quad (5)$$

Setzt man mehrere Gauss'sche Verteilungskurven derart zusammen dass man ihre Ordinaten addiert, so erhält man das sogenannte Mischkollektiv, dessen Verteilungskurve der Gleichung [1]

$$\psi(x) = \sum_k f_k(x) \quad (6)$$

genügt. Dabei k die Nummer der jeweiligen Gausskurve bedeutet,

f — Für jede Gruppe werden der mittleren Schwebstofftrieb $Mg_{,k}$ durch errechnen der Funktionswerte sowie das gewogene mittel des Abflusses einer Gruppe Q_m mit folgenden Gleichungen ermittelt.

$$Mg_{,i} = A'_i \cdot S_x \cdot \sqrt{2\pi}, \quad Mg_{,k} = \sum Mg_{,i} \quad \text{und} \quad Q_m = \frac{\sum_{i=1}^n g_{,i} \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^n g_{,i}} \quad (7)$$

Diese Berechnungsweise ist umständlich und zeitraubend. Rémy schlägt deshalb selbst vor, die Ermittlung des mittleren Schwebstofftriebes einer Gruppe aus dem arithmetischen Mittel der gesamten Schwebstoffwerte einer Gruppe zu ermitteln, also

$$Mg_{,m} = \frac{\sum_{i=1}^n g_{,i}}{n} \quad (8)$$

g — Die mittleren Wertepaare $Mg_{,}$ und Q_m liegen im doppelt logarithmischen System annähernd auf einer Gerade. Daher nach dem Ergebnis der Untersuchungen können die Schwebstoffführung $g_{,}$ (kg s) in einem Flussquerschnitt durch eine Exponentialfunktion des Abflusses Q_m ausgedrückt werden.

$$g_s = a \cdot Q^n \quad (9)$$

Andererseits Schwebstoffgehalt C (kg/m^3) begriffsmässig gleich den quotienten aus Schwebstoffführung und Abfluss ist, kann man auch schreiben

$$C = \frac{g_s}{Q} = \frac{a \cdot Q^n}{Q} = a \cdot Q^{n-1} \quad (10)$$

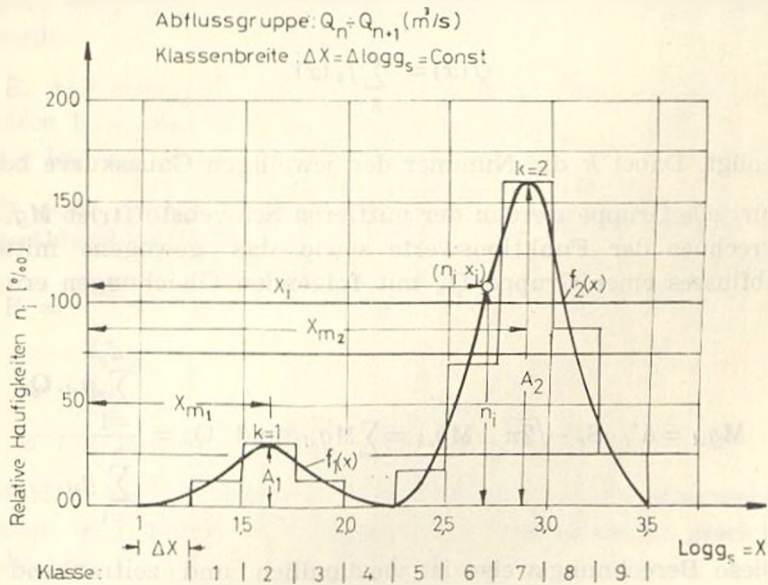


Abb. 1 Schematische Darstellung des Stufenpolygons und der Verteilungskurven

5. Anwendung der Methode auf die Schwebstoffmesswerte der Oker

Die mittlere Verhalten der umfangreichen Schwebstoffmessungen, die vom Leichtweiss - Institut in der Oker durchgeführt wurden [2, 3, 4], vom Verfasser mit Hilfe der statistischen Auswertungsmethode der Grosszahlforschung ausgewertet. Die Messerwerte werden in drei Gruppen zusammengefasst, innerhalb jeder Gruppe, Q_m als gewogenes Mittel der Messwasserführung mit dem zugehörigen Schwebstoffführung bzw. Gesamttrückstand als Gewicht und die Mg , und Mg_R wieder mit Hilfe von Gauss'schen Normalverteilungskurven ermittelt.

Danach kann der Zusammenhang zwischen Gesamtrückstand und Abfluss mit folgender Exponentialgleichung angegeben werden (Abb. 2 und 4) :

$$g_R = 0,61 \cdot Q \quad (11)$$

wobei bedeuten

g_R = Gesamtrückstand (kg/s)

Q = Abfluss ($m^3 \cdot s$)

Nach der angegebenen Gleichung besteht zwischen dem Gesamtrückstand und dem Abfluss eine lineare Abhängigkeit

Die mittlere Schwebstoffführung der Oker kann nach der gleichen Methode mit folgender Exponentengleichung des Abflusses ausgedrückt werden (Abb. 3 und 4) :

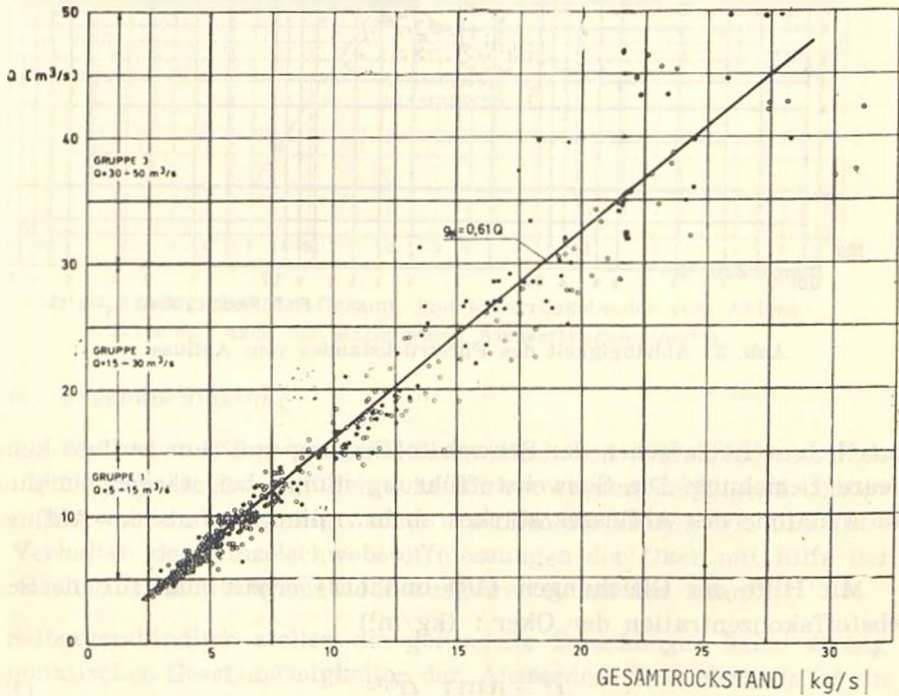


Abb. 2 Abhängigkeit des Gesamtrückstandes vom Abfluss

$$g_s = 0,011 \cdot Q^{1,49} \quad (12)$$

wobei bedeuten

g_s = Schwebstoffführung (kg/s)

Q = Abfluss (m³/s)

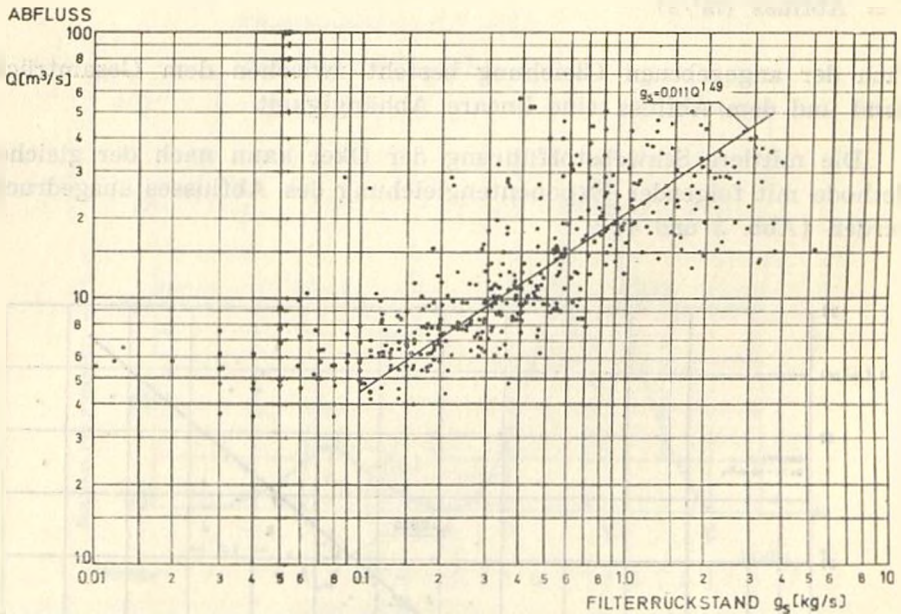


Abb. 3 Abhängigkeit des Filtrerrückstandes vom Abfluss

Danach besteht zwischen der Schwebstoffführung und dem Abfluss keine lineare Beziehung. Die Schwebstoffführung nimmt bei stärker Zunahme und Abnahme des Abflusses stärker ab bzw. nimmt zu als der Abfluss.

Mit Hilfe der Gleichungen (10) und (12) erhält man für die Schwebstoffkonzentration der Oker : (kg m³)

$$C = 0,011 \cdot Q^{0,49} \quad (13)$$

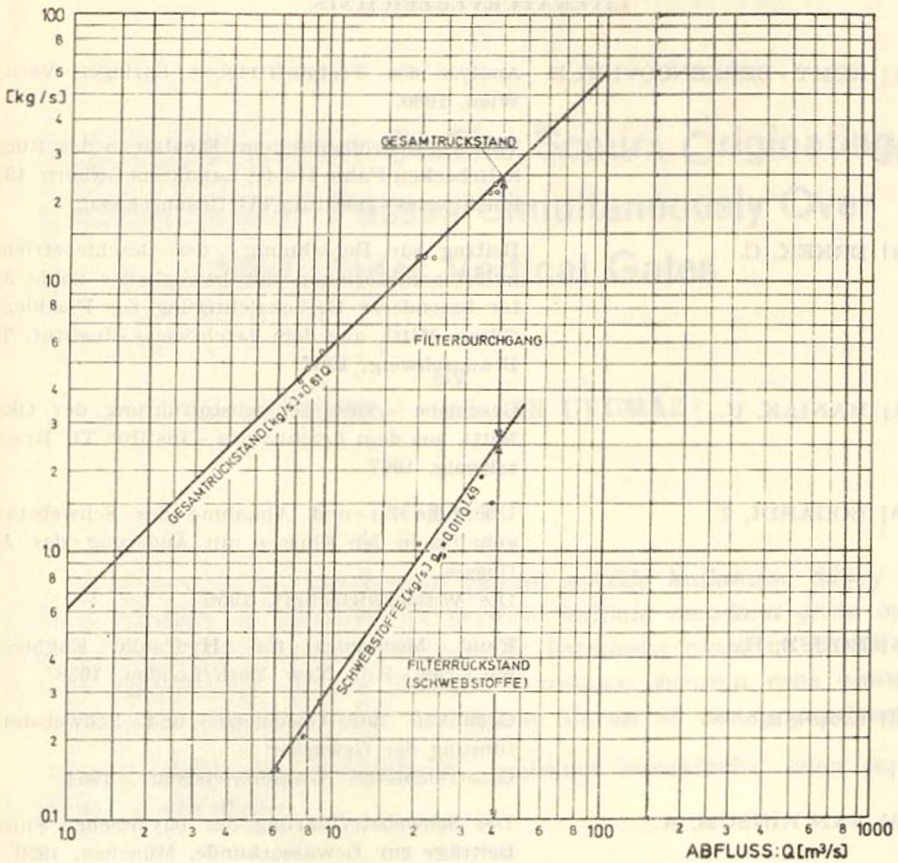


Abb. 4 Abhängigkeit des Gesamt- und Filtrerrückstandes vom Abfluss
(Errechnet nach der statistischen Auswertungsmethode)

6. Zusammenfassung

Die Schwebstoffführung der Flüsse sind von verschiedenen Faktoren abhängig, die sich zur Zeit sehr schwer zusammenhängend deuten lassen. Es wurde aber gezeigt, ohne Ursachen zu kennen wie das mittlere Verhalten der Einzelschwebstoffmessungen der Oker mit Hilfe der statistischen Auswertungsmethode ausgewertet werden kann.

Selbstverständlich stellen die gefundene Beziehungen keine streng mathematischen Gesetzmässigkeiten dar. Ausserdem diese Methode ist ein reines Auswertungsverfahren. Aber das Ergebnis des Verfahrens als Schwebstofftriebgleichung aufzufassen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] RÊMY - BERZENCOVICH, E. Analyse des Feststofftriebes. Springer - Verlag, Wien, 1960.
- [2] Wassergüteprobleme beim Einstau in das Rückhaltebecken Fahle Heide, Landkreis Gifhorn. 1966 Leichtweiss - Institut, TU Braunschweig
- [3] ERKEK, C. Beitrag zur Berechnung des Geschiebetrriebes in offenen Gerinnen mit beweglicher Sohle unter besonderer Berücksichtigung der Flachlandflüsse. Mittl. aus dem Leichtweiss - Institut, TU Braunschweig, 1967
- [4] MANIAK, U. Geschiebe - und Schwebstoffführung der Oker. Mittl. aus dem Leichtweiss - Institut TU Braunschweig, 1967
- [5] BOGÂRDI, J. Über die Zu - und Abnahme des Schwebstoffgehaltes in den Flüssen mit Änderung des Abflusses. Die Wasserwirtschaft, 1956
- [6] ROUSE, H. Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers. Mc. Graw - Hill, New York/London, 1938
- [7] KRESSER, W. Gedanken zur Geschiebe - und Schwebstoffführung der Gewässer. Österreichische Wasserwirtschaft, 1964
- [8] VAN RÏNSUM, A. Die Schwebstoffführung der bayerischen Flüsse. Beiträge zur Gewässerkunde, München, 1950
- [9] ROSENAUER Die Schwebstoffführung der Donau bei Linz. Wasserwirtschaft, 1933
- [10] BAYAZIT, M. Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliđi. İTÜ. İnş. Fak. Matbaası, 1971