

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 105 (1987)
Heft: 38

Artikel: Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse
Autor: Fehr, René
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76710>

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: 16.01.2026

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

Verifikation der Kostenfunktionen

Die mit den Kostenfunktionen berechneten Investitionskosten für fünf kleinere Anlagen im Kanton Graubünden und acht Anlagen im Kanton Baselland konnten mit den effektiven Kosten dieser Anlagen verglichen werden. Bei diesen Anlagen wurden bei der Bauabrechnung die Kosten für Honorar, Land, Erschliessung und z.T. auch für Installationen und Umgebungsarbeiten einzeln aufgeführt. Somit konnten die Investitionskosten der eigentlichen Kläranlagen verglichen werden (Tabelle 5).

Schlussfolgerungen

Die zusammengestellten Informationen bilden eine Datenbasis für die Kostenermittlung für kleinere Kläranlagen dar. Die auf diese Weise ermittelten

Kosten bilden die Grundlage für den Kostenvergleich der möglichen Massnahmen-Varianten bei der abwassertechnischen Sanierung in ländlichen Gebieten. Das Vorgehen bei der Untersuchung der Sanierungsmöglichkeiten wird in der Arbeit von Krejci und Gujer [3] detailliert dargestellt.

Die Kostenangaben in dieser Arbeit sollen nicht unkritisch angewendet werden. Die relativ detaillierten Informationen über die Randbedingungen dieser Kostenfunktionen sollen dem Anwender ermöglichen, diese Angaben an seine aktuellen Verhältnisse anzupassen.

Adresse der Verfasser: V. Krejci, dipl. Ing., Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), 8600 Dübendorf, und H. Bachmann, dipl. Ing. ETH, Ing.-Büro, 6003 Luzern.

Literatur

- [1] Bundesamt für Umweltschutz Bern. Unveröffentlichte Angaben aus Erhebungen der Betriebsdaten von Kläranlagen in der Schweiz, 1980.
- [2] Gujer, W., Krejci, V. und Eichenberger, E. Hinweise für die Wahl von Einleitungsbedingungen für kleine Abwasserquellen. GWA 1982/11.
- [3] Krejci, V. und Gujer, W. Abwassersanierung in ländlichen Gebieten, Fallstudie Romoos. EAWAG-Separatum Nr. 951, Mai 1983.
- [4] Goronszy, M. C., Barnes, D. und Irvine, R. L. Intermittent Biological Treatment Systems - Process Considerations, Vortrag AICHE, Chicago, 1980.
- [5] Bundesamt für Umweltschutz Bern. Stand der kommunalen Abwasserreinigung in der Schweiz 1979.
- [6] Amt für Gewässerschutz des Kantons Graubünden. Unveröffentlichte Angaben über Kosten der Kläranlagen, persönliche Mitteilung 1984.
- [7] Wasserwirtschaftsamt des Kantons Basel-Land. Unveröffentlichte Angaben über Kosten der Kläranlagen, Persönliche Mitteilung, 1984.

Einfache Bestimmung der Korngrössenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse

Von René Fehr, Zürich

Die Lösung von hydraulischen Problemen oder von Fragen im Zusammenhang mit dem Geschiebetransport in Gebirgsflüssen und Wildbächen erfordert die genaue Kenntnis der Korngrössenverteilung des Grundmaterials. Es wird eine Methode vorgestellt, die bei relativ kleinem Aufwand eine rasche und sichere Aussage über die grössenmässige Zusammensetzung des Sohlenmaterials erlaubt. Dabei wird mittels sogenannter «Linienzahlanalysen» die Verteilung der Grobkomponenten im Feld ausgemessen, während die Feinstanteile mit Hilfe einer Fullerverteilung rechnerisch angenähert werden.

Einleitung

Die Bearbeitung von flussmechanischen und flussbaulichen Problemen erfordert die Kenntnis von verschiedenen Parametern. Eine wichtige Grösse ist die Korngrössenverteilung des für die Untersuchung relevanten Materials. Es muss dabei zwischen dem transportierten Geschiebematerial, dem an der Oberfläche der Sohle liegenden Deckschichtmaterial und dem die Sohle bildenden Unterschichtmaterial unterschieden werden. Die verschiedenen Materialien werden in der Rechnung meist durch wenige charakteristische Korndurchmesser erfasst. So wird zum Beispiel die Rauhig-

keit mit dem Durchmesser des 90prozentigen Siebdurchgangs d_{90} der Unterschicht bestimmt. Berechnungen zum Geschiebetransport werden mit dem Durchmesser des 50prozentigen Siebdurchgangs d_{50} oder dem mittleren Durchmesser d_m durchgeführt ($d_m = \sum \Delta p_i \cdot d_{mi}$, wobei d_{mi} den charakteristischen (mittleren) Durchmesser der Fraktion i bezeichnet). Anhand der Korngrössenverteilung des Unterschichtmaterials kann auch die Deckschichtbildung fraktionsweise berechnet werden. Die verwendeten Formeln basieren dabei meist auf Resultaten von Laborversuchen. Bei diesen wurde jeweils durch Siebanalysen die Korngrössenverteilung des verwendeten Sand- oder Kiesmaterials bestimmt. Für die

Anwendung solcher Formeln gilt es darum, auch in Natur eine Korngrössenverteilung zu bestimmen, welche einer Siebanalyse des Untergrundmaterials entspricht. Dasselbe gilt bei der Bestimmung der Korngrössenverteilung für hydraulische Modellversuche mit beweglicher Sohle.

Probeentnahmen und Analysenverfahren

In der Bodenmechanik sind verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Kornverteilungskurven eines Materials bekannt. Diese werden üblicherweise für die Bedürfnisse in der Flusshydraulik übernommen. So werden zur Bestimmung der Korngrössenverteilung in der Natur meistens sogenannte «Volumengewichtsanalysen» der Unterschicht durchgeführt. Dabei werden die in der Flusssohle an der Oberfläche liegenden Steine entfernt und vom darunterliegenden Material ein bestimmtes Probevolumen entnommen. Diese Probe wird anschliessend nach Durchmesserklassen (= Fraktionen) ausgesiebt und gewogen. Die Korngrössenverteilung wird dann mittels Gewichtsprozenten in den einzelnen Fraktionen in einer Summenhäufigkeitskurve $p_i = f(d_i)$ (siehe DIN 66141) festgehalten. Dieses Verfahren wird aber bei zu-

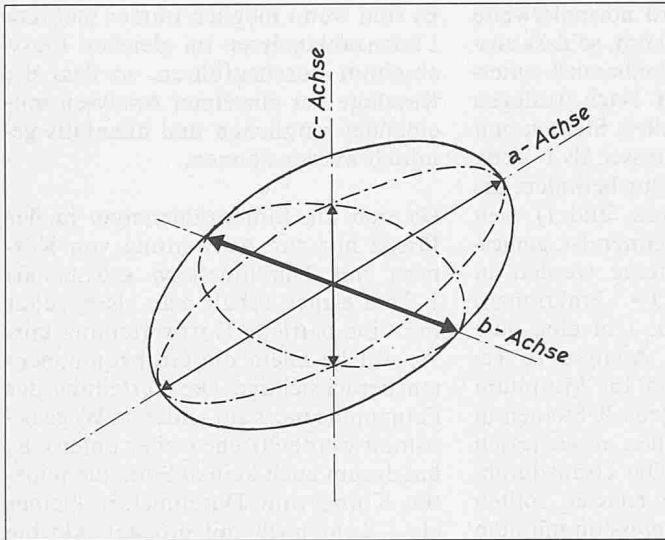


Bild 1. Die drei Hauptachsen eines Steines. Bei der Linienzahlanalyse wird die mittlere Achse (b-Achse) gemessen

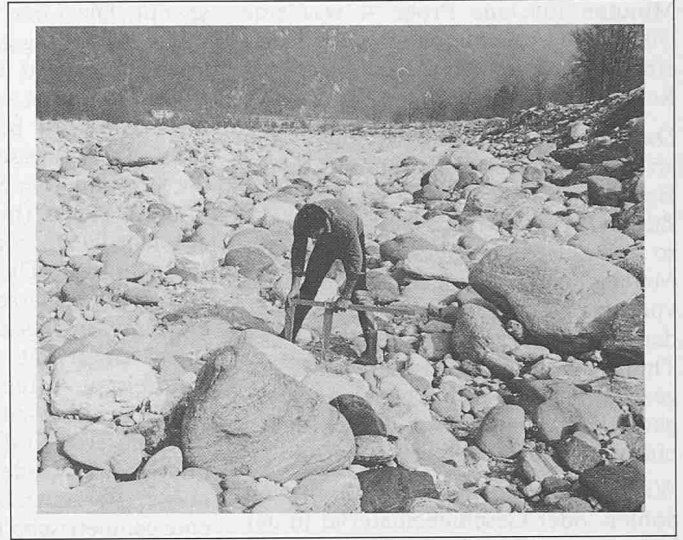
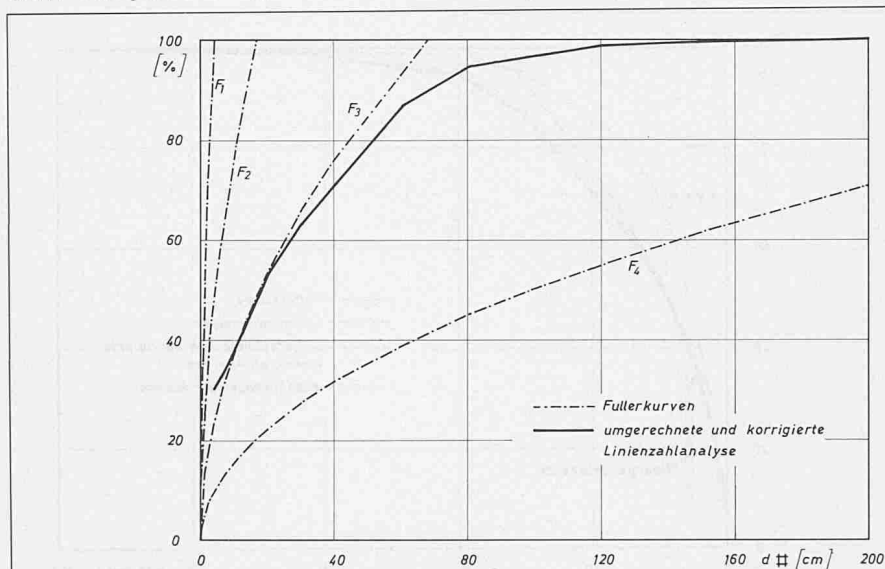


Bild 2. Durchführung einer Linienzahlanalyse mit Hilfe einer «Försterlehre». Eine Schnur bestimmt die auszumessenden Steine

Bild 3. Prinzip des Anschmiegens einer Fullerkurve an die umgerechnete und korrigierte Linienzahlanalyse



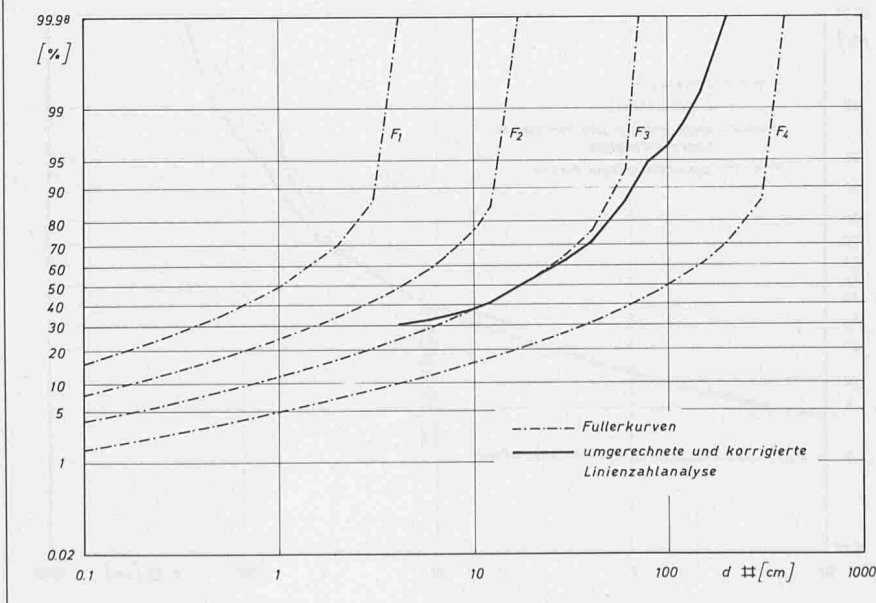
nehmendem Maximalkorndurchmesser immer aufwendiger und beim Auftreten von Körnern grösser als etwa 20 cm praktisch nicht mehr durchführbar (empfohlenes Volumen der zu untersuchenden Probe: $V[m^3] \geq 2,5 \cdot d_{max}$ [m]; d.h. bei $d_{max} = 0,20$ m wird $V \geq 0,50$ m³!). Dies führt dazu, dass die groben Komponenten bei der Analyse nicht mehr oder nur ungenau berücksichtigt werden.

Es sind noch eine Anzahl weiterer Analyse- und Auswertverfahren bekannt (alle in [3] beschrieben), es soll aber hier nicht weiter auf sie eingegangen werden. Wie bei der Volumengewichtsanalyse wird aber bei den meisten Verfahren die Verteilung der Grobkomponenten nur ungenau oder gar nicht erfasst.

Die Linienzahlanalyse der Deckschicht

Das Problem der exakten Erfassung der Grobkomponenten einer Korngrössenverteilung kann mit der Durchführung einer sogenannten «Linienzahlanalyse», wie sie in [5] vorgestellt wird, einfach gelöst werden.

Es handelt sich dabei um eine äusserst anwenderfreundliche Methode. Kein anderes Analyse- und Auswertverfahren gestattet, vor allem im Felde, eine derart rasche Erfassung einer repräsentativen Probe des Grobmaterials. Die Probe kann lokal konzentriert sein, aber auch fast beliebig erweitert werden. Der Aufwand für die Durchführung und Auswertung einer Linienzahlanalyse ist zudem sehr bescheiden – zwei Arbeitskräfte benötigen etwa 15



Minuten für eine Probe –, was eine wiederholte Anwendung und somit eine Beurteilung der Aussagekraft des Resultats ermöglicht.

Das Verfahren wurde bereits mehrfach an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) erfolgreich angewendet, so zum Beispiel im Zusammenhang mit Modellversuchen im Zusammenfluss von Maggia und Melezza, bei verschiedenen Wildbächen, aber auch bei der Thur in Weinfelden. Es hat sich ferner gezeigt, dass dieses Vorgehen auch bei gewässerökologischen Beurteilungen eine wertvolle Hilfe bietet.

Wie bei allen Analyseverfahren von Sohlen- oder Geschiebmaterial in der Natur ist auch bei der Linienzahlanalyse die Wahl des geeigneten Standortes von entscheidender Bedeutung. Dieser ist zunächst abhängig von dem zu untersuchenden Problem. Soll zum Beispiel der Fließwiderstand oder der Erosionswiderstand der Ufer bestimmt werden, wird man das Material der Uferregion untersuchen und nicht die Korngrößenverteilung der Sohle in Flussmitte bestimmen. Fehler bei der Wahl des Standortes entstehen vor allem, wenn nur einzelne und nicht repräsentative Proben durchgeführt werden. So sollte für die Bestimmung des Fließwiderstandes der Sohle der Standort der Probeentnahme nicht auf einer frischen Kiesbank (also neu transportiertem Geschiebmaterial) gewählt oder gar nur die Sandablagerungen in einer Ruhigwasserzone ausgewertet werden.

Da mit Hilfe einer Linienzahlanalyse vor allem die Verteilung der Grobkomponenten untersucht werden kann, wird diese auch an einer Stelle durchgeführt, wo die Grobkomponenten konzentriert auftreten, nämlich an geeigneter Stelle der Deckschicht. Das Material der Unterschicht, wo die grossen Steine nur vereinzelt auftreten, findet sich in anderer Zusammensetzung an der Deckschicht, wird doch diese infolge eines Sortiereffekts aus der Unterschicht gebildet. Dieser Effekt führt aber dazu, dass die Grobkomponenten überbewertet werden, was bei der Umrechnung der Resultate der Linienzahlanalyse der Deckschicht in eine Volumengewichtsanalyse der Unterschicht berücksichtigt werden muss.

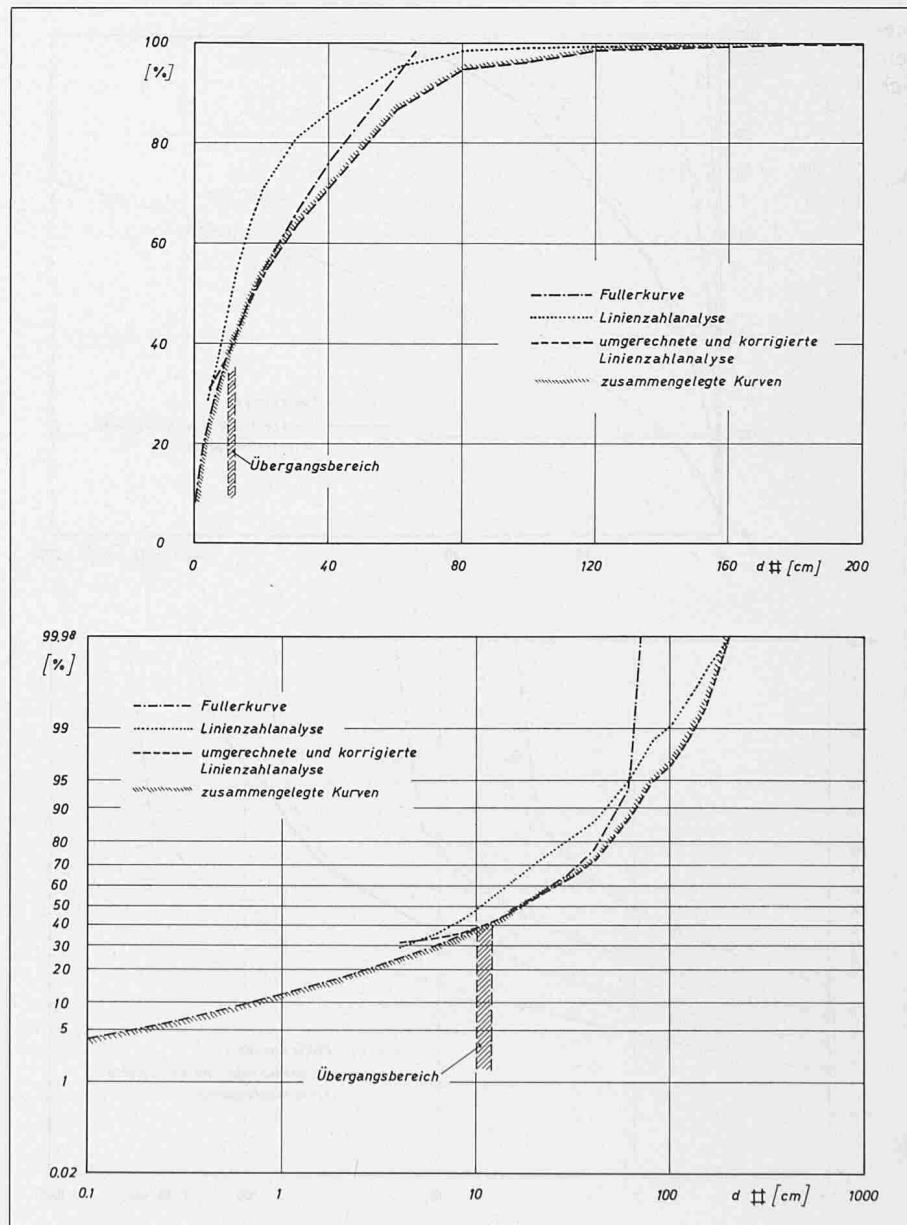
Linienzahlanalysen werden im Normalfall bei Niedrigwasser im Gerinne durchgeführt. Sie können aber im Bedarfsfall auch in knöcheltiefem Wasser angewendet werden. Um systematische Fehler bei der Auswahl der zu untersuchenden Steine zu vermeiden, wird über die zu analysierende Deckschicht eine Schnur oder ein Messband ge-

spannt. Die Linie wird normalerweise in Fließrichtung gespannt, so dass zwischen Ufer- und Sohlenbereich unterschieden werden kann. Nach Auslegen der Linie wird bei allen Steinen mit einem Durchmesser grösser als 1–2 cm, die sich unter der Schnur befinden, die mittlere Achse (b-Achse, Bild 1), welche sehr leicht zu erkennen ist, gemessen (Bild 2). Die Steine werden in Durchmesserklassen (= Fraktionen) eingeteilt und gezählt. Um eine gute Repräsentativität der Analyse zu gewährleisten, sollten so im Minimum 150 Steine mit wenigstens 30 Steinen in den mittleren Fraktionen ausgemessen und gezählt werden. Die Grenzdurchmesser der einzelnen Klassen sollten eine geometrische Progression mit dem Quotienten $\sqrt{2}$ bilden. Als geeignet hat sich auch eine Abstufung erwiesen, wie sie aus dem Formular im angeführten Beispiel ersichtlich ist.

Es sind wenn möglich immer mehrere Linienzahlanalysen im gleichen Flussabschnitt durchzuführen, so dass die Resultate der einzelnen Analysen miteinander verglichen und allenfalls gemittelt werden können.

Da sich die Linienzahlanalyse in der Praxis nur zur Auswertung von Körnern mit Durchmessern grösser als 1–2 cm eignet, erhält man als Resultat nur eine partielle Kornverteilungskurve, welche allein die Grobkomponenten berücksichtigt. Die Verteilung der Feinanteile muss auf anderem Wege bestimmt werden (siehe weiter unten). Es hat darum auch keinen Sinn, die feineren Körner mit Durchmesser kleiner als 1–2 cm noch mit grösster Akribie bestimmen zu wollen. Einerseits wird man dabei viel Zeit verlieren, die man besser in die Durchführung einer weiteren Linienzahlanalyse investiert. An-

Bild 4. Vorhersage des Anteils an Feinmaterial durch starre Zusammenlegung der umgerechneten und korrigierten Linienzahlanalyse mit einer Fullerkurve



dererseits ist es auch äusserst schwierig, in einem Flussbett Steine mit einem Durchmesser kleiner als 1 cm exakt auf einer Linie zu entnehmen (Breite des ausgelegten Messbandes: 2 cm!). Man wird sehr rasch auch Steine ausmessen, die neben bzw. unter der eigentlichen Linie liegen, und so den Anteil der Feinkomponenten sehr stark überschätzen.

Wie bereits gesagt, muss die Verteilung der Feianteile auf andere Weise bestimmt werden. Dazu kann im Prinzip eine Volumengewichtsanalyse der Unterschicht durchgeführt werden. Diese müsste dann nur die feineren Fraktionen berücksichtigen (bis ungefähr 10–20 cm Durchmesser), so dass das Probevolumen entscheidend vermindert werden kann.

Eine andere einfache und für praktische Berechnungen meist genügend genaue Näherung ist die Annahme einer Verteilung der Feianteile nach Fuller.

$$(1) \quad p(d) = \sqrt{d/d_{\max}}$$

Diese Annahme der Verteilung der Feianteile aufgrund ihrer Packungsdichte ist insofern gerechtfertigt, als eine solche in schweizerischen Flüssen bzw. in Flüssen des Alpenraumes (zumindest für $d \leq d_{90}$) im allgemeinen vorgefunden wird (siehe [4]). Meistens kann also auf die Durchführung von speziellen Analysen zur Bestimmung

der Korngrößenverteilung der Feinkomponenten verzichtet werden.

Umrechnung in eine Korngrößenverteilung der Unterschicht

Wie eingangs bereits gesagt, gehen alle Formeln zur Berechnung von hydraulischen Problemen von der Korngrößenverteilung der Unterschicht aus. Nach der Durchführung von einer oder mehreren Linienzahlanalysen der Deckschicht ist es darum notwendig, die Resultate dieser Analyse umzurechnen. Eine Formel, die das fraktionsweise Umrechnen einer Linienzahlanalyse erlaubt, lautet (Herleitung siehe [3] und [2]):

$$(2) \quad \Delta p_i = \frac{\Delta q_i \cdot d_{mi}^{0,80}}{\sum_1^n \Delta q_i \cdot d_{mi}^{0,80}}$$

wobei

ΔP_i = Gewicht der Fraktion i /
Gewicht der ganzen Probe
(Volumengewichtsanalyse der Unterschicht)

Δq_i = Anzahl Steine der Fraktion i /
Anzahl Steine der ganzen Probe
(Linienzahlanalyse der Deckschicht)

d_{mi} = charakteristischer (mittlerer)
Korndurchmesser der Fraktion i
 n = Anzahl Fraktionen

0,80 = Exponent α der Umrechnung einer Linienzahlanalyse der Deckschicht in eine Volumengewichtsanalyse der Unterschicht

Die feinsten Fraktionen der Linienzahlanalyse werden dabei durch dieses Potenzgesetz unterschätzt. Dies vor allem, weil mit der Methode der Linienzahlanalyse die Verteilung der feineren Komponenten wegen der Schwierigkeit des genauen Erfassens der Steine mit kleinem Durchmesser nur ungenau bestimmt werden kann. Die Korngrößenverteilung muss darum nach der Umrechnung mit folgender Beziehung korrigiert werden:

$$(3) \quad p_{ic} = 0,25 + 0,75 \cdot \sum_1^i \Delta p_i$$

wobei:

p_{ic} = korrigierte Summenhäufigkeit der Fraktion i

Δp_i = Gewicht der Fraktion i /
Gewicht der ganzen Probe

Die so erhaltene Korngrößenverteilung muss nun noch durch die Verteilung der Feinkomponenten ergänzt werden. Bei der Annahme einer Verteilung nach Fuller wird ein Bereich der umgerechneten und korrigierten Linienzahlanalyse gesucht, in welchem die Steigung der Tangente (bei linearer Aufzeichnung der Korndurchmesser) derjenigen einer Fullerkurve folgt (Bild

Bild 6. Formular zur Durchführung und Auswertung von Linienzahlanalysen mit Beispiel einer solchen

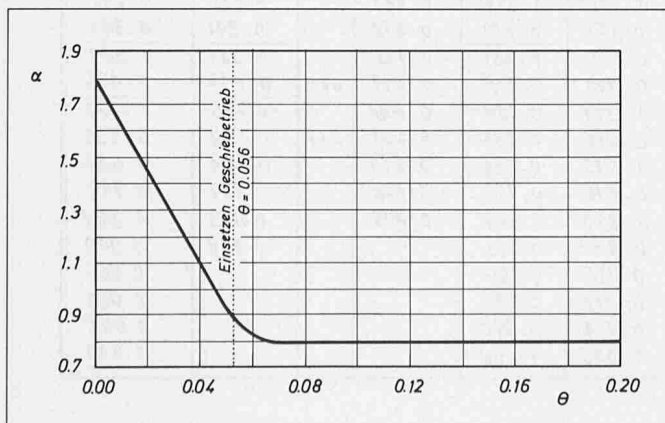
GESCHIEBEANALYSE Beispiel DATUM _____
Linienzahlanalyse No. _____ BEOBACHTER _____

Standort _____

Fraktion [cm]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	n	$\Delta\%$	Fraktion [cm]	$\Sigma\%$	
<1															
1-2	///	///	///	///							17	0,110	2,0	0,110	
2-3	///	///	///	///							13	0,084	3,0	0,195	
3-4	///	///	///	///							10	0,065	4,0	0,260	
4-6	///	///	///	///							14	0,091	6,0	0,351	
6-8	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	26	0,169	8,0	0,519	
8-10	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	32	0,208	10,0	0,727	
10-12	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	22	0,143	12,0	0,870	
12-15	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	2	0,013	15,0	0,883	
15-20	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	8	0,052	20,0	0,935	
20-25	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	3	0,019	25,0	0,955	
25-30	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///			30,0	0,967	
30-35	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	2	0,013			
35-40	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	1	0,006	40,0	0,974	
40-50	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	2	0,013			
50-60	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///			60,0	0,987	
60-80	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	1	0,006			
80-100	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	1	0,006	100,0	1,000	
100-120															
120-150															
150-200															
>200															
Σ											154	1,000			

$d_{\max} = 93$ [cm] VAW 85

Bild 5. Exponent α der Umrechnung in Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung (Shield's-Faktor θ)



3). (Der besseren Übersicht halber ist in Bild 3 und Bild 4 jeweils einer linearen Darstellung eine Darstellung auf Wahrscheinlichkeitspapier mit logarithmischer Einteilung der Durchmesser gegenübergestellt. Da die Verteilung der Grobkomponenten im Prinzip eine Extremwertverteilung ist, erscheinen die Resultate der Linienzahlanalyse mehr oder weniger als log-normalverteilte Geraden.)

Bei der Konstruktion der endgültigen Kornverteilungskurve des Unterschichtmaterials wird angenommen, dass diese bis zum Übergangsbereich der Fullerkurve folgt, während die Grobanteile nach der umgerechneten und korrigierten Linienprobe verteilt sind (Bild 4).

Diskussion anhand von Versuchen an der VAW

An der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) wurden grossmassstäbliche Laborversuche durchgeführt, um die Umrechnung von einer Analysenart in eine andere zu bestimmen. Dabei sollte vor allem auch der Einfluss einer

hydraulischen Belastung, welche die Korngrößenverteilung der Deckschicht verändert, auf die Umrechnung untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden in einer 10 m langen und 1 m breiten Rinne verschiedene bekannte Materialmischungen unterschiedlichen Abflussmengen ausgesetzt und anschliessend die gebräuchlichsten Analyseverfahren durchgeführt.

Somit war es möglich, die Resultate verschiedener Analysen bei kontrollierten hydraulischen Bedingungen einander gegenüberzustellen. Die Verhältnisse, wie sie in der Laborrinne untersucht wurden, entsprachen dabei einem Längenmassstab zur Natur von etwa 1:1 bis 1:10.

Für die Umrechnung einer Linienzahlanalyse der Deckschicht in eine Volumengewichtsanalyse der Unterschicht ergab die Untersuchung der Abhängigkeit des Exponenten α von der hydraulischen Belastung folgende Resultate. Bei fehlender Beanspruchung (Shield's-Faktor $\theta = 0,00$) nimmt α den Wert 1,80 an. Dieser Wert nimmt mit einsetzender Belastung sehr schnell ab (Bild 5) und erreicht kurz nach Einsetzen des Geschiebetriebs ($\theta = 0,056$) den nahezu konstanten Wert $\alpha = 0,80$.

Da selbst eine kleine hydraulische Belastung genügt, diesen Wert zu erreichen und sich dieser mit zunehmender Belastung nicht ändert, kann für die Umrechnung einer Linienzahlanalyse der Deckschicht eines natürlichen Fließgewässers in die entsprechende Volumengewichtsanalyse der Unterschicht mit dem Wert $\alpha = 0,80$ gerechnet werden.

Mit Hilfe der bekannten Soll-Korngrößenverteilung konnte anschliessend auch der Wert der durchzuführenden Korrektur (Gl.2) bestimmt werden.

Die so im Labor gefundenen Resultate zeigen auch beim Vergleich mit vorhandenen Naturdaten eine gute Übereinstimmung. Dies gilt auch für die beschriebene Annahme der Verteilung der Feinkomponenten nach Fuller.

Beispiel

Bild 6 zeigt das Ergebnis einer im Feld durchgeführten Linienzahlanalyse der Deckschicht anhand eines Formulars, wie es mit Vorteil verwendet wird. Mehrere solcher Analysen werden im zu untersuchenden Flussabschnitt

Bild 7. Formular zur Umrechnung von Linienzahlanalysen der Deckschicht in Volumengewichtsanalysen der Unterschicht und Abschätzung der Verteilung der Feinkomponenten nach Fuller

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d_i [cm]	$d_{m_i} = (d_i + d_{i+1})/2$	$q_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^i n_j$	$\Delta q_i = q_{i+1} - q_i$	$\Delta q_i \cdot d_{m_i}^{0.8}$	$\Delta P_i = \frac{\Delta q_i \cdot d_{m_i}^{0.8}}{\sum \Delta q_i \cdot d_{m_i}^{0.8}} = \frac{K_{0.5}}{\sum K_{0.5}}$	$P_i = \sum_{j=1}^i \Delta P_i$	$P_i c = 0.25 + 0.75 \cdot P_i$	$P_{Fu(i+1)} = \sqrt{\frac{d_{i+1}}{d_i} \cdot \frac{P_i}{P_i c^{2.0}}}$	Wahl Übergangsbereich (u+1)	$P_{iFu} = \sqrt{\frac{d_i}{d_u} \cdot \frac{P_i}{P_u c^{2.0}}}$	V_{P_i} Volumengewichtsanalyse der Unterschicht
0.10										0.038	0.038
0.25										0.060	0.060
0.50										0.085	0.085
1.00										0.120	0.120
2.00										0.170	0.170
3.00	2.50									0.209	0.209
4.00	3.50									0.241	0.241
5.00	5.00	0.288	0.288	0.785	0.082	0.082	0.311			0.295	0.295
6.00	7.00	0.344	0.069	0.327	0.021	0.103	0.327	0.381		0.341	0.341
8.00	9.00	0.413	0.062	0.360	0.034	0.137	0.353	0.378		0.381	0.381
10.00	11.00	0.475	0.066	0.449	0.047	0.175	0.381	0.395		0.417	0.417
12.00	14.25	0.541	0.103	0.863	0.090	0.221	0.416	0.417	u+1	0.488	0.488
16.50	18.25	0.644	0.063	0.643	0.067	0.311	0.484	0.488	(u+1)	0.539	0.539
20.00	25.00	0.707	0.100	1.313	0.137	0.378	0.534	0.534		0.634	0.634
30.00	35.00	0.807	0.056	0.963	0.100	0.515	0.634	0.654		0.712	0.712
40.00	50.00	0.863	0.087	1.989	0.207	0.616	0.712	0.736		0.933	0.933
60.00	70.00	0.950	0.035	1.047	0.109	0.823	0.867	0.872		1.000	1.000
80.00	90.00	0.985	0.006	0.220	0.023	0.932	0.949	...			
100.00	110.00	0.991	0.005	0.215	0.022	0.955	0.966	...			
120.00	135.00	0.996	0.003	0.152	0.016	0.978	0.983				
150.00	175.00	0.999	0.001	0.062	0.006	0.994	0.995				
200.00		1.000				1.000	1.000				
$\Sigma = 9.591$											

durchgeführt, miteinander verglichen und falls möglich gemittelt.

Die Resultate dieser Mittelbildung der Feldaufnahmen werden ins Formular «Umrechnung und Abschätzung der Feianteile» (Bild 7) in die Kolonnen 1 und 3 übertragen (im Beispiel sind infolge der beschriebenen Mittelbildung die Werte der Kolonne 3 nicht mit dem Resultat der Linienzahlanalyse im Feld identisch!). Anschliessend werden die charakteristischen Durchmesser d_i der einzelnen Fraktionen bestimmt (Kol. 2) sowie die Differenzprozente Δq_i der einzelnen Fraktionen bestimmt (Kol. 4). Fraktionsweise wird nun die Umrechnung gemäss Gleichung 2 durchgeführt (Kol. 5, 6). In Kolonne 7 werden die Prozente der umgerechneten Linienzahlanalyse wieder aufsummiert.

Die notwendige Korrektur der Feianteile erfolgt nach Gleichung 3 in Kolonne 8. Man erhält so eine partielle Volumengewichtsanalyse der Unterschicht, welche nur die Grobkomponenten berücksichtigt.

Zur Abschätzung der Verteilung der Feinkomponenten wird nun eine Fullerkurve gesucht, die sich an die errechnete Kurve anschmiegt. Dazu werden im Prinzip $(n-1)$ Fullerkurven berechnet und verglichen, wie gut diese der Verteilung der Grobkomponenten folgen. Ausgehend von der i -ten Fraktion wird in Kolonne 9 die prozentuale Verteilung einer Fullerkurve an der $(i+1)$ -ten Stelle berechnet. Es wird zuerst mit Hilfe der Gleichung 1 ausgehend von den Werten d_i und p_{ic} an i -ter Stelle das d_{max} der Fullerkurve berechnet. Mit d_{max} und d_{i+1} kann nun an der $(i+1)$ -ten Stelle ein Wert $p_{FU(i+1)}$ (Kol. 9) berechnet werden, der ebenfalls auf dieser Fullerkurve liegt (d_{max} entspricht $d/p_i c^{2.0}$). Nun wird verglichen, wie gut der Wert $p_i + p_c$ der errechneten Kurve an $(i+1)$ -ter Stelle mit dem Sollwert der Fullerkurve $p_{FU(i+1)}$ übereinstimmt. Ist

die Übereinstimmung gut, so folgt die Korngrössenverteilung der Grobkomponenten in diesem Abschnitt bereits weitgehend einer Fullerkurve, und die Verteilung der Feinkomponenten braucht nur noch nach unten ergänzt zu werden.

Im einzelnen wird die Stelle $(u+1)$ des Übergangsbereichs so festgelegt, dass $p_{FU(i+1)}$ nicht an den Rand des Überlappungsbereichs der beiden Kurven (Kol. 8 und 11) zu liegen kommt (im Beispiel sind sowohl bei $d_i = 12,00$ cm als auch bei $d_i = 20,00$ cm die Werte von $p_{FU(i+1)}$ und von p_{ic} ähnlich, der Übergangsbereich wurde aber bei $d_i = 12,00$ cm gewählt, um die zweite Bedingung des möglichst vollständigen Ausnutzens der Grobkomponenten zu erfüllen).

Ist der Übergangsbereich bestimmt (Kol. 10), so kann mit Hilfe von d_i und dem dazugehörigen Prozentwert p_{ic} an der Stelle u die Verteilung der Feianteile berechnet werden (Kol. 11), wobei die Durchmesser nach unten hin ergänzt werden müssen, bis die zugehörigen Prozente so klein werden, dass diese Fraktionen keinen Einfluss mehr auf die ganze Verteilung haben. Die komplette Kornverteilungskurve (Kol. 12) setzt sich nun bis zum Übergangsbereich aus dem Ergebnis der berechneten Fullerkurve (Kol. 11) zusammen, während sie oberhalb des Übergangsbereichs der Verteilung der umgerechneten und korrigierten Linienzahlanalyse (Kol. 8) folgt.

Schlussfolgerungen

Mit der vorgestellten Methode:

- Bestimmen der Verteilung der Grobkomponenten von Sohlenmaterial mittels Linienzahlanalysen der Deckschicht im Felde,

- Umrechnen der Linienzahlanalyse der Deckschicht in eine Volumengewichtsanalyse der Unterschicht,
- Vorhersage des Anteils an Feinmaterial durch Zusammenlegen der umgerechneten und korrigierten Probe der Grobkomponenten mit einer Fullerkurve

hat man ein Instrumentarium zur Hand, das mit relativ kleinem Aufwand eine gute und sichere Aussage über die Korngrössenverteilung in einem Fließgewässer unter Berücksichtigung der Grobkomponenten erlaubt.

Adresse des Verfassers: R. Fehr, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Literaturhinweise

- [1] Anastasi, G.: «Geschiebeanalysen im Felde unter Berücksichtigung von Grobkomponenten». Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 70, 1984
- [2] Fehr, R.: «Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen - Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren». Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 92, 1987.
- [3] Kellerhals, R., Bray, D.I.: «Sampling Procedures for Coarse Fluvial Sediments». ASCE Proceedings, JHD, VOL. 97, HY8, 1971.
- [4] Meyer-Peter, E., Müller, R.: «Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs». Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH Zürich, Nr. 16, 1949.
- [5] Muir, T.C.: «Sampling and Analysis of Coarse Riverbed Sediments». Proceedings, Mississippi Water Resources Conference, Water Research Institute, Mississippi State University, State College, Miss., 1969.