

Einführung in den Sedimententransport offener Gerinne

Autor(en): **Zeller, Jürg**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **81 (1963)**

Heft 36

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-66867>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne

DK 627.157.001

Von J. Zeller, dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau (VAWE) an der ETH, Zürich

Schluss von Heft 35, Seite 626

III. Die Schwebstoffführung in offenen Gerinnen

Wie im Abschnitt I/2 über den «Mechanismus des Sedi-menttransportes» festgestellt wurde, besteht ein kontinuierlicher Austausch von Sedimentteilchen, die die Gerinnesohle verlassen, in die turbulente Strömung hineingetragen werden und nach einiger Zeit wieder zur Sohle zurückkehren. Diese Teilchen werden, solange sie sich in der turbulenten Strömung, aber ausserhalb des durch die Vorgänge an der Gerinnesohle direkt beeinflussten Bereiches aufhalten, als Schwebstoffe bezeichnet. Daneben sind noch Teilchen vorhanden, die ständig in Suspension verbleiben, d. h. die derart beschaffen sind, dass sie das turbulente Strömungsfeld nie verlassen. Ihre Fortbewegung ist ebenfalls massgebend durch die turbulente Wasserbewegung bestimmt.

Wie beim Geschiebetrieb, kann häufig auch bei Suspensionen ein *Beginn* der Schwebstoffbildung bzw. des Schwebstofftriebes beobachtet werden. Dieser Beginn geht häufig demjenigen des Geschiebetriebes voraus, vor allem dann, wenn die Gerinnesohle aus sehr ungleichkörnigem Material aufgebaut ist, oder wenn das Einzugsgebiet viel Feinstmaterial liefert. Leider sind diese Vorgänge noch sehr wenig erforscht, so dass hierüber kaum konkrete Angaben gemacht werden können.

Entsprechend dem engen Zusammenhang zwischen dem Schwebstofftransport und den Turbulenzeigenschaften der Strömung wurde von O'Brien [24] und später von Rouse [26] die «Diffusionsgleichung turbulenter Strömungen» benutzt, um die Schwebstoffverteilung in einem offenen Gerinne zu ermitteln. O'Brien fand die Beziehung:

$$(28) \quad c_z w + \epsilon_s \frac{dc}{dz} = 0$$

c_z = Konzentration in einem beliebigen Punkt im Abstand z über der Gerinnesohle in g/l oder Gewicht %.

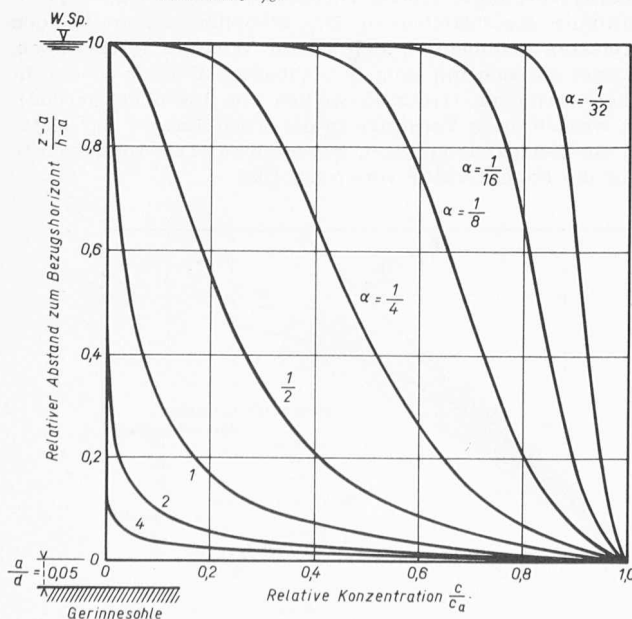


Bild 21. Sedimentkonzentration in Abhängigkeit von α für zwei-dimensionalen, gleichförmigen Abfluss und voll ausgebildete Turbulenz.

w = Sinkgeschwindigkeit der Partikel in fliessendem Wasser in m/s.

Will man einen Naturvorgang untersuchen, so ist w unter den selben Bedingungen, wie sie in Natur auftreten, zu bestimmen, d. h. gleiche Konzentration, gleiche Temperatur usw. Einfachheitshalber wird w häufig als Sinkgeschwindigkeit eines Einzelkornes in stehendem Wasser angenommen. Die hierdurch entstehende Unschärfe des Resultates für c darf aber nicht ausser acht gelassen werden.

ϵ_s = Diffusionskoeffizient für Sedimente.

Weitere theoretische Studien und experimentelle Untersuchungen führten zur untenstehenden Gleichung (29), die den Suspensionsgehalt für zweidimensionalen Abfluss in Abhängigkeit der Wassertiefe h wiedergibt. Mit

$$\epsilon_s = K \sqrt{\tau_0/\rho} \left(\frac{h-z}{z} \right)^{\alpha} \quad \text{lautet sie:}$$

$$(29) \quad \frac{c}{c_a} = \left[\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right]^{\alpha}$$

c_a = Konzentration im Abstand a von der Gerinnesohle

$$\alpha = \frac{w}{\beta K \sqrt{\tau_0/\rho}}$$

K = von Kármán-Konstante (siehe Gl. 15)

β = Koeffizient; $\beta \leq 1,0$

Gleichung (29) ist für verschiedene Parameter α in Bild 21 dargestellt. Sie zeigt, dass in Sohlennähe die grösste Konzentration vorhanden ist, wenn α gross ist, d. h. wenn z. B. die Sinkgeschwindigkeit gross bzw. die Partikel grobkörnig sind. Die Konzentration ist hingegen nahezu über die gesamte Wassertiefe gleichmässig verteilt, wenn α klein ist. α kann näherungsweise als proportional zum Verhältnis Sinkgeschwindigkeit w zu Strömungsgeschwindigkeit v interpretiert werden.

Messungen und Vergleichsberechnungen von A. Vanoni [26] am Unterlauf des Missouri River zeigen im allgemeinen eine erfreuliche Uebereinstimmung mit der Theorie. Weitere bemerkenswerte Arbeiten, die u. a. die Eigenschaften grosser Konzentration in Sohlennähe zum Gegenstand haben, stammen von H. A. Einstein [13, 27].

Leider ist man heute noch nicht so weit, für Flüsse, von denen keine *Suspensionsgehaltsmessungen* vorliegen, die Berechnung des Schwebstofftransportes durchzuführen. Abgesehen davon, ist Gleichung (29) nicht sehr befriedigend, weil sie in unmittelbarer Sohlennähe unendlich grosse Konzentrationen ergibt, weshalb man in der Berechnung einen sohlennahen Streifen von der Mächtigkeit a , die sogenannte «Sohlenschicht», in der Betrachtung ausschliesst.

Es gibt noch andere Lösungsmöglichkeiten für den Ansatz von O'Brien, wie z. B. diejenige von Kalinske [28], in dem die Diffusion als eine konstante Grösse (konstante «Durchmischungslänge») angenommen wird. Man findet derart für die Konzentrationsverteilung:

$$(30) \quad \frac{c}{c_a} = e^{-15(z-a)/h \cdot w / \sqrt{\tau_0/\rho}}$$

Der Schwebstofftransport pro m Gerinnebreite lässt sich danach berechnen zu

$$g_s = q c_a e^{+15 a/h \cdot w / \sqrt{\tau_0/\rho}} P_*$$

$P_* = \text{Integral}$ (siehe Bild 22).

Einstein [27] geht demgegenüber von der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung der Strömung aus und findet für den Schwebstofftransport:

$$(31) \quad g_s = 11,6 \sqrt{\tau_0/\rho} c_a a \left[\ln \frac{z}{h} (I_1 + I_2) \right]$$

mit den Integralen

$$I_1 = 0,216 E \int_{a/h}^1 \left(\frac{1-z}{z} \right)^\alpha dz$$

$$I_2 = 0,216 E \int_{a/h}^1 \left(\frac{1-z}{z} \right)^\alpha \ln z dz$$

$$E = \left(\frac{a}{h} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{a}{h} \right)^{-\alpha}$$

Einstein gibt in zwei Diagrammen seines Aufsatzes [13, 27] die Werte I in Abhängigkeit von α und a/h wieder. Der Ausdruck $11,6 \sqrt{\tau_0/\rho}$ in Gleichung (31) bedeutet die Strömungsgeschwindigkeit am äusseren Rand der laminaren Grenzschicht, falls die Gerinnesohle glatt ist.

Wie früher erwähnt, besteht keine genau definierte Abgrenzung zwischen dem Bereich des Schwebstofftransportes und demjenigen des Geschiebes. Genauere Untersuchungen lassen vermuten, dass die Diffusionseigenschaften («Durchmischungslänge») in der Nähe einer Gerinnebegrenzung stark abnehmen. Einstein gibt die Wasserschicht über der Sohle («Sohlenschicht»), in der die Diffusionswirkung praktisch verschwindet, mit $a = 2 \cdot d$ an. Er rechnet diesen Bereich zur Geschiebetriebzone. Diese Feststellung ist für die Berechnung des Gesamt-Sedimenttransportes von Bedeutung (siehe Kapitel IV).

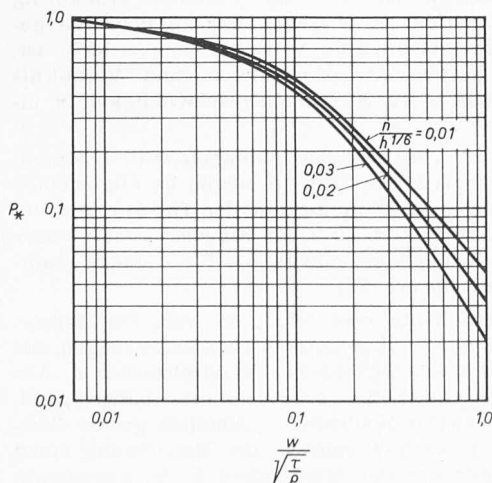


Bild 22. Integral P_* der Kalinske-Gleichung (30) für verschiedene Verhältnisse der Sohlenrauigkeit (bzw. für verschiedene Turbulenzgrade) n = Rauigkeitsbeiwert nach Manning
Der Rauigkeitsbeiwert nach Strickler ist umgekehrt proportional zu demjenigen von Manning: $k = 1/n$. Die Verschiedenheit der Masssysteme ist zu berücksichtigen, nämlich k in $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ und n in $ft^{-1/3} \cdot s^{-1}$

Trotz eingehenden Untersuchungen von J. N. Hunt [29], der unter Berücksichtigung des von den Partikeln beanspruchten Raumes der Gleichung (29) die Form gibt

$$(32) \quad \left(\frac{c_z}{1-c_z} \right) \left(\frac{1-c_a}{c_a} \right) = \left[\left(\frac{1-z/h}{1-z/h} \right)^{1/2} \left(\frac{B_s - (1-a/h)^{1/2}}{B_s - (1-z/h)^{1/2}} \right) \right]^\alpha$$

$B_s = \text{Konstante}$, wenig kleiner als 1,0

ist eine spürbare Abweichung zwischen α gemessen und α berechnet feststellbar. Bild 23 weist auf diese Diskrepanz hin. Die erwähnte Untersuchung von Einstein und Chien zeigt eine bessere Erfassung der tatsächlichen Verhältnisse und damit eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten. Dies wurde durch geeignetere Ansätze für die Durchmischungslänge erreicht, die sie ihrer Berechnungsmethode zugrunde legten.

Sämtliche besprochenen Gleichungen beruhen, streng genommen, auf der Annahme einheitlichen Korndurchmessers. Einstein [13] schlägt nun vor — wie er es schon beim Geschiebetrieb mit Erfolg angewendet hat — die Berechnung derart durchzuführen, dass die einzelnen Kornfraktionen einer Kornverteilung einzeln, d.h. wie im Falle einheitlichen Korndurchmessers bestimmt und anschliessend addiert werden. Einstein und Chien [28] empfehlen hierfür eine Unterteilung in 6 bis 8 Kornfraktionen. Obwohl dieses Vorgehen vom energetischen Standpunkt aus beurteilt kaum haltbar scheint, haben Laboratoriumsversuche und Messungen in Natur eine annehmbare Bestätigung dieses Vorgehens erbracht.

Trotz den vielen Anstrengungen, die bis heute unternommen worden sind, wissen wir über die tatsächlichen Vorgänge recht wenig, und es ist noch viel Forschungsarbeit zu leisten, bis das Schwebstofftrieb-Problem als gelöst betrachtet werden kann.

Der Vollständigkeit halber sei noch auf eine weitere spezielle Form des Sedimenttransportes hingewiesen, die sogenannte «Dichteströmung». Falls kein oder doch nur ein äusserst geringer Austausch von Sedimentteilchen mit der Gerinnesohle erfolgt und die Suspension sich nicht mit ihrer Flüssigkeitsumgebung durchmischt, es sich also um Strömungsvorgänge einer Flüssigkeit höherer Dichte (und eventuell Viskosität) in einer solchen geringeren Dichte handelt, so spricht man von einer Dichteströmung. Allerdings geht es bei diesem Phänomen weniger um die Beschreibung des Sedimenttransportes als um eine solche der hydraulischen Strömungsvorgänge. Solche Dichteströmungen sind z.B. in Stauräumen festzustellen, in dem Strömungsfelder, beladen mit feinsten Sedimenten, sich «unter Wasser» fortbewegen, ohne dass sie sich mit dem benachbarten Wasser zu durchmischen vermögen (trotz Re -Zahlen von bis über 100 000). Meist werden diese Vorgänge in der Fachliteratur der Kategorie der Schichtströmungen zugerechnet. Der Interessierte sei auf die Fachliteratur verwiesen [33].

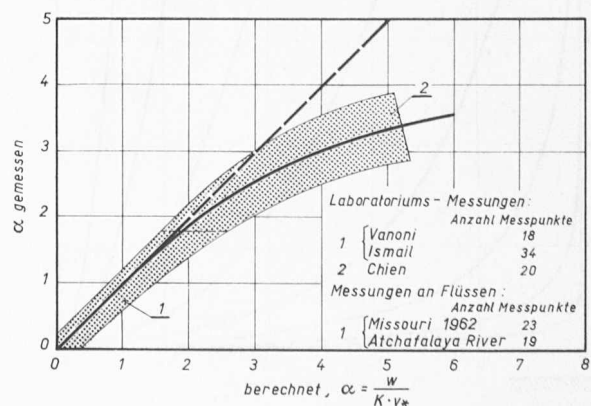


Bild 23. Zusammenhang zwischen α gemessen und α berechnet gemäss Gleichung (29) nach H. A. Einstein und Ning Chien

IV. Der Gesamt-Sedimenttransport in offenen Gerinnen

Die getrennte Beschreibung der Geschiebeführung einerseits und der Schwebstoffführung andererseits soll nicht die Meinung aufkommen lassen, dass diese voneinander scharf getrennte Phänomene seien. Vielmehr ist ein enger Zusammenhang festzustellen, in dem der Austausch von Sedimentteilchen zwischen Sohlen- und Schwebstoffbereich ein massgebendes Element der Gesamt-Sedimentführung darstellt. In den meisten natürlichen Gewässern ist deshalb eine Kombination der beiden Vorgänge vorhanden.

1. Berechnung des Gesamt-Sedimenttransportes

Grundsätzlich ist die total transportierte Sedimentmenge die Summe aus Geschiebeführung und Schwebstoffführung, nämlich:

$$(33) \quad g_{tot} = g_G + g_S$$

Man kann demnach g_{tot} berechnen, indem man eine geeignete Geschiebetriebsgleichung zur Bestimmung von g_G benützt und ebenso g_S mit Hilfe einiger Naturmessungen in Verbindung mit einer Schwebstofftriebsgleichung ermittelt. Dieser trivial scheinenden Feststellung wäre nichts hinzuzufügen, wenn es nicht ausserordentlich wichtig wäre, mehr über den gegenseitigen Zusammenhang zwischen Geschiebe- und Schwebstoffführung zu wissen. Man hat sich deshalb in letzter Zeit speziell mit folgenden Fragen abgegeben:

- Zulässigkeit und Ausmass einer Beschränkung des Geschiebetriebes auf die sog. «Sohlenschicht».
- Korrelation der Schwebstoffkonzentration direkt ausserhalb dieser «Sohlenschicht» mit der Konzentration bzw. Geschiebeführung innerhalb dieser «Sohlenschicht».

Frage zwei schliesst in sich ein, dass der Schwebstofftransport eine Folge des Austauschvorganges ist, und deshalb von den Vorgängen an der Gerinnesohle abhängt. Es können demnach in der nachfolgenden Betrachtung Schwebstoffe, die ständig in Suspension verbleiben, also sohlenfremdes Material darstellen, nicht berücksichtigt werden. Dies entspricht der früher erwähnten Voraussetzung des «Sedimenttransportes in eigener Alluvion».

Von den ersten, die diesen Zusammenhängen nachgingen, sind Lane und Kalinske [31] zu nennen. Sie nahmen an, dass die Sedimentmenge, die in Suspension übergeht, proportional sei zu:

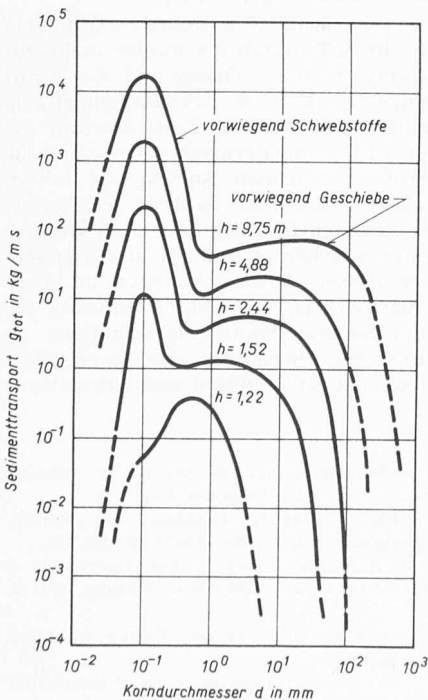


Bild 24. Gesamtsedimenttransport des Missouri River in Abhängigkeit von Korndurchmesser und Wasserführung (Wassertiefe h), nach H. A. Einstein.

- dem relativen Anteil dieser Partikel in der Gerinnesohle
- der Grösse der vorhandenen Vertikalgeschwindigkeit der Strömung und dem Vermögen, diese Partikel hochzuheben
- der relativen Zeit, während derer die Geschwindigkeit gross genug ist, um die Partikel eines bestimmten Durchmessers hochzuheben.

Diese Näherungsannahmen ermöglichten die gewünschte Kombination der Vorgänge. Allerdings setzten sie die Gültigkeit der Suspensionsgleichung (29) bis zur Gerinnesohle voraus.

Einstein [12] andererseits argumentiert, dass Sedimente in Sohlennähe nicht mehr in Suspension gehalten werden können, wenn sie sich im Bereich befinden, in dem die «Wirbel der turbulenten Strömung» mit der Grösse der Sedimentkörner vergleichbar werden. Er führt deshalb die schon mehrmals genannte «Sohlenschicht» ein, die er zur Geschiebetriebszone rechnet. Er zeigt, wie der Sedimenttransport in dieser «Sohlenschicht» durch die Vorgänge entlang der eigentlichen Sohle beeinflusst wird (vgl. S. 630, linke Spalte). Ebenso ist es möglich, den Zusammenhang zwischen der «Sohlenschicht» und der darüberliegenden Schwebstoffzone herzustellen, wodurch z. B. Gleichung (29) für den Bereich ($h-a$) angewendet werden kann.

Unter stark vereinfachenden Annahmen und ausgehend von Gleichung (31) gibt er folgende Beziehungen an:

- Der totale Sedimenttransport (aufgespalten in einzelne Kornfraktionen) ist:

$$(34) \quad i_{tot} g_{tot} = \sum i \cdot g = i_G g_G + i_S g_S$$

- und der relative Anteil des Geschiebes am Gesamtsedimenttransport beträgt:

$$(35) \quad \frac{i_G g_G}{i_{tot} g_{tot}} = \frac{1}{P I_1 + I_2 + 1}$$

I_2 ist negativ

$$P = \frac{1}{0,434} \log \frac{30,2 x}{d/h}$$

d = massgebender Korndurchmesser

x = hydraulischer Korrekturkoeffizient

Bild 24 gibt das Resultat einer Berechnung des Gesamtsedimenttransportes für den Missouri River nach Einstein wieder. Für Hochwasser ist ein typisches starkes Ansteigen des transportierten Feinmaterials zu erkennen, was darauf schliessen lässt, dass bei Mittel- bis Hochwasser am Missouri River der Schwebstoffanteil den Geschiebeanteil bei weitem überwiegt.

Auch Bagnold [32] hat sich bemüht, «Sohleneigenschaften» in der Berechnung des Sedimenttransportes zu berücksichtigen; desgleichen Laursen [33]. Letzterer versucht, die Schlepptension an der Sohle in die Berechnung der Gesamtsedimentführung einzubeziehen. Er findet für die über den gesamten Gerinnequerschnitt gemittelte Sedimentkonzentration, d. h. gemeinsam für Geschiebe und Schwebstoffe:

$$(36) \quad \bar{c} = \sum p \left(\frac{d}{h} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1 \right) f \cdot \left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{w} \right)$$

p = Anteil der Kornfraktion vom Durchmesser d an der Sohlenkornverteilung

τ'_0 = Anteil der Sohlenschlepptension nach Abzug des für die Ueberwindung der Sohlenreibung benötigten Teiles

f = Reibungsverlustfaktor nach Darcy-Weisbach

Mit Hilfe dieser Gleichung kann g_{tot} ermittelt werden. Laursen zeigt in Bild 25 die Güte seiner Gleichung im Vergleich zu Messungen verschiedener Autoren. Es ist einschränkend festzustellen, dass er seine Untersuchungen nur mit Feinmaterial im Bereich 0,01 bis 0,12 mm durchgeführt hat, weshalb vorläufig von einer Anwendbarkeit seiner Beziehung für unsere schweizerischen Verhältnisse abgesehen werden muss.

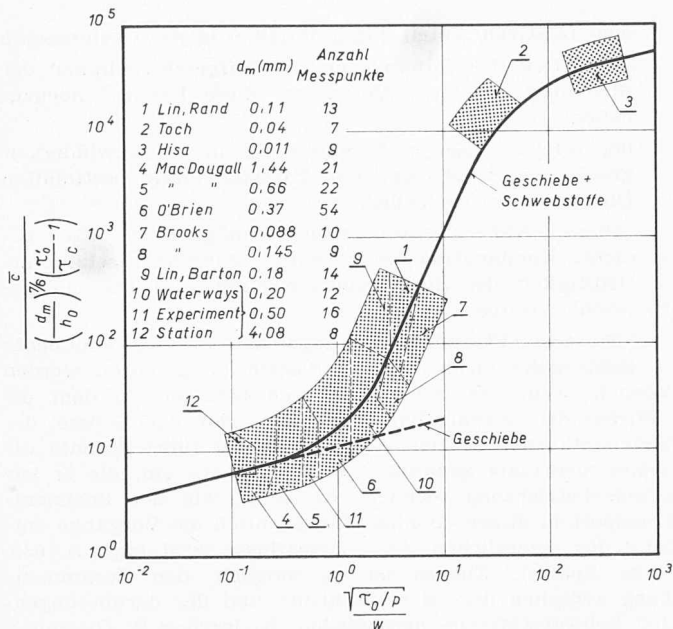


Bild 25. Zusammenhang zwischen der mittleren Konzentration c und den hydraulischen und Sedimentcharakteristiken, nach Laursen

Trotz der in Bild 25 gezeigten, recht guten Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung bestehen laut *Bondurant* [34] dennoch Unstimmigkeiten, wenn Naturmessungen herangezogen werden. *Garde und Albertson* [35] erwähnen in einer Diskussion der Arbeit von Laursen ihre eigenen bis heute vorliegenden Versuchsergebnisse. Diese lassen sich durch folgende Gleichung¹³⁾ charakterisieren:

$$(37) \quad \frac{h \sqrt{\tau_0/\rho}}{\nu g_{tot}^{1/3}} = \left(\frac{h}{d} \frac{1}{\chi} \right)^{3/2}$$

ν = Kinematische Zähigkeit

χ = Funktion, die nur von der Kornzusammensetzung der Sohle abhängig ist (siehe Diagramm im Originaltext)

$$\frac{h \sqrt{\tau_0/\rho}}{\nu} = \text{«Reynoldische Zahl» an der Sohle}$$

mit der «Sohlenschergeschwindigkeit» $v_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$

Die Untersuchungen wurden für Rohrleitungen durchgeführt und anschließend auf offene Gerinne übertragen. Für den von den Autoren untersuchten Korndurchmesserbereich von rd. 0,01 bis 2,00 mm stimmen die Messresultate aus Laboratoriumsrinnen mit den Rechnungswerten sehr gut überein.

Bogardi [36] seinerseits versucht die Ergebnisse von Laursen mit einem «Sohlenstabilitätsfaktor» $\frac{g d}{v_*^2}$ zu vergleichen und findet derart

$$\frac{g d}{v_*^2} = \text{Funktion von} \left[\frac{\bar{c}}{\left(\frac{d}{h} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_c} - 1 \right)} \right]$$

Diese Funktion ist primär nur von der Sohlenform (Sohlenwellen) abhängig, wie er anhand von Diagrammen zeigt.

Diese sich in letzter Zeit häufenden Untersuchungen lassen erkennen, wie brennend man an einer Lösung interessiert ist, aber auch wie wenig man heute noch darüber weiss. Es ist sicherlich noch verfrüht, die neuesten Erkenntnisse schon für praktische Zwecke verwenden zu wollen.

¹³⁾ Diese Gleichung ist dimensionsbehaftet und wurde nicht ins Dezimalsystem übertragen.

2. Abschliessende Bemerkungen zum Sedimenttransport-Problem

Diese «Einführung in den Sedimenttransport» lässt erkennen, wie viel Arbeit schon geleistet worden ist. Je mehr man jedoch in diese Materie eindringt, um so komplizierter und vielfältiger scheinen die Probleme zu werden und um so mehr Kenntnisse hydromechanischer und -dynamischer Art sind erforderlich, um diese Vorgänge mathematisch erfassen zu können. Man mag sich füglich fragen, wie Aufgaben der Ingenieurpraxis anzupacken sind, um mit dem vorhandenen Rüstzeug an Gleichungen auszukommen. Ohne Kompromisse und viel Erfahrung kommt man auch heute nicht aus. Ein wünschbares Vorgehen für Berechnungen flussbaulicher Art, das gute Resultate verspricht und schon öfters Anwendung fand, ist folgendes:

Man wählt sich an dem zu untersuchenden Flusse eine nahegelegene repräsentative Flusstrecke aus, eine sog. «Musterstrecke» und misst daran sämtliche hydraulischen und Sediment-Daten möglichst in Abhängigkeit der Wasserführung. Hierauf untersucht man, welche der Sedimentgleichungen am besten mit den Naturmessungen in Übereinstimmung gebracht werden kann, bzw. welche Anpassungen an den Koeffizienten einer ausgewählten Gleichung notwendig sind, um Übereinstimmung zu erzielen. Hierauf kann die eigentliche Aufgabe flussbaulicher Natur in Angriff genommen werden. — Für unsere Verhältnisse in der Schweiz ist erfahrungsgemäss die Geschiebetriebgleichung von Meyer-Peter (Gl. 20) gut geeignet. Die meisten flussbaulichen Probleme werden danach untersucht, und es besteht kein triftiger Grund, diese Gleichung zu verlassen und durch eine andere zu ersetzen. Für die Berechnung der Schwebstoffführung können die Gleichungen (29) und (31) benützt werden, doch ist es notwendig, mangels genügender Erfahrung und ausreichender Messungen über Schwebstoffführung unserer Flüsse, diese Gleichungen mit Hilfe einiger Suspensionsgehaltsmessungen, möglichst über einen weiten Bereich von Q , zu ergänzen.

Zur Veranschaulichung des Gesamt-Sedimenttransportes dienen die Bilder 26 bis 28, denen zu entnehmen ist, dass der Schwebstoffanteil auch in schweizerischen Flüssen weit aus grösser ist, als gemeinhin angenommen wird und deshalb je nach Problemstellung zu berücksichtigen ist (z. B. Verlandung von Flachstrecken und Stauräumen). Für die Bettbildung eines Flusses scheint jedoch in unseren Verhältnissen vorwiegend der Geschiebetrieb massgebend zu sein.

Um aber gerüstet zu sein für die in Zukunft auftretenden flussbaulichen Arbeiten, die z. T. durch die immer mehr zunehmende «Geschiebearmut» unserer Flüsse und die damit verbundenen Veränderungen am Flusbett gekennzeichnet sein werden, ist es notwendig, nicht nur im Laboratorium die Untersuchungen weiterzuführen, sondern vor allem auch die Messungen auf die Natur auszudehnen. So wie seit Jahren die Wasserführung unserer Gewässer laufend registriert wird, so sollte auch die Sedimentführung gemessen werden, als Ergänzung zur systematischen Aufnahme der Längen- und Querprofile unserer Flüsse. Dieses Anliegen ist nicht nur der Wunsch des Hydraulikers, um mehr Erfahrung für die Verwendbarkeit von Sedimenttransportgleichungen zu sammeln, sondern mindestens ebenso sehr eine notwendige Grundlage für die Lösung unserer heutigen und zukünftigen Bauaufgaben.

Literaturverzeichnis

- [1] *M. K. Gilbert* (1914): Transportation of debris by running water. U.S. Geological Survey, Professional Paper 86.
- [2] *R. Müller* (1960): Die Entwicklung der flussbaulichen Hydraulik. «Wasser- und Energiewirtschaft» Nr. 8/9/10, S. 292/300.
- [3] *H. A. Einstein* und *R. B. Banks* (1950): Fluid resistance of composite roughness. «Trans. Am. Geophys. Union», Bd. 31, p. 603/610.
- [4] *H. Schlichting* (1958): Grenzschicht-Theorie, Verlag G. Braun, Karlsruhe, 3. Auflage, S. 116.
- [5] *H. Rouse* (1962): Energy transformation in zones of separation. International Association for Hydraulic Research, 9th Convention, Dubrovnik 1961.
- [6] *A. Shields* (1936): Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. «Mitt. preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau u. Schiffbau».

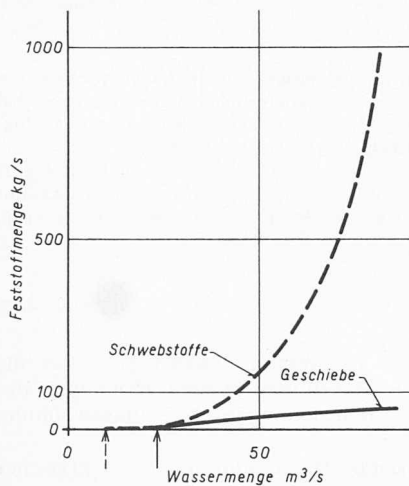


Bild 26. Schwebstoffführung der Massa im Massaboden, aufgenommen im Jahre 1958/59 durch die Electricité de France im Auftrage der Société Générale pour l'Industrie in Genf. Speziell eingetragen ist der Beginn der Schwebstoffführung bzw. der Geschiebeführung

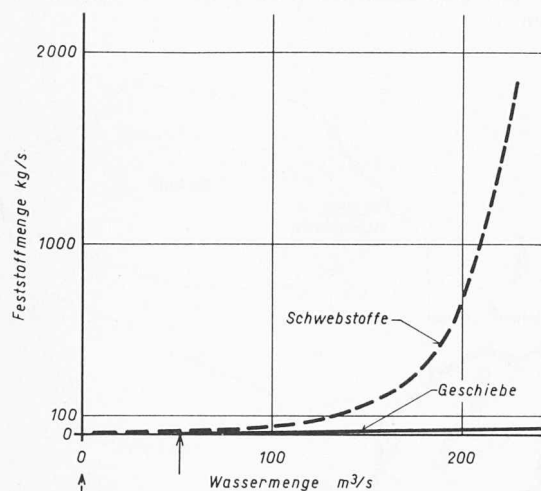


Bild 27. Schwebstoffführung der Aare bei Brienzwiler, aufgenommen im Jahre 1936 durch das Eidg. Amt für Wasserwirtschaft

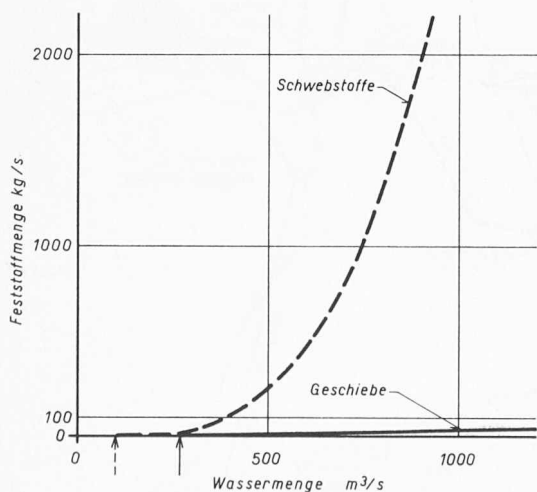


Bild 28. Schwebstoffführung des Rheins bei Brugg SG, aufgenommen in den Jahren 1936/39 durch die Rheinbauleitung

- [7] C. M. White (1940): The equilibrium of grains on the bed of a stream. «Proc. Roy. Soc. London», p. 322/338.
- [8] A. A. Kalinske (1947): Movement of sediment as bed in rivers. «Trans. Am. Geophys. Union», p. 615/620.
- [9] P. du Boys (1879): Le Rhône et les rivières à lit affouillable. «Annales Ponts et Chaussées», Ser. 5, p. 141/195.
- [10] L. G. Straub (1935): The Missouri River. 73d Congr., 2d Session, H. D. 238, p. 1135.
- [11] A. Schoklitsch (1934): Der Geschiebetrieb und die Geschiebefracht. «Wasserkraft u. Wasserwirtschaft», 29. Jahrg., Heft 4, S. 37/43.
- [12] E. Meyer-Peter und R. Müller (1949): Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. «Schweiz. Bauzeitung», 67. Jahrg., Nr. 3, S. 29.
- [13] H. A. Einstein (1950): The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Techn. Bulletin No. 1026, Sept. 1950.
- [14] H. A. Einstein (1937): Der Geschiebetrieb als Wahrscheinlichkeitsproblem. Mitteilungen der VAWE, Zürich.
- [15] H. A. Einstein (1942): Formulas for the transportation of bed-load. «Trans. ASCE», Vol. 107, p. 561/577.
- [16] C. B. Brown (1943): The control of reservoir silting. U.S. Dept. of Agriculture, Misc. Publ. 521.
- [17] B. R. Colby und C. H. Hembree (1955): Computations of total sediment discharge, Niobara River near Cody, Nebraska. U.S. Geological Survey, Water-Supply, Paper 1357, 1955.
- [18] B. R. Colby und D. W. Hubbell (1961): Simplified methods for computing total sediment discharge with the modified Einstein procedure. U.S. Geological Survey, Water-Supply, Paper 1593, 1961.
- [19] R. A. Bagnold (1943): The physics of blown sand and desert dunes. William Morrow & Co., New York.
- [20] Ning Chien (1954): Meyer-Peter formula for bed-load transport and Einstein bed-load function. M. R. D. Sediment Series No. 7, Corps of Engineers, Missouri River Division, Omaha, Nebraska.
- [21] S. Yalin (1957): Die theoretische Analyse der Mechanik der Geschiebebewegung. «Mitt. der Bundesanstalt für Wasserbau», Nr. 8.
- [22] Ning Chien (1954): The present status of research on sediment transport. «Proc. ASCE», Vol. 80, Sep. No. 55.
- [23] M. G. Mostafa (1949): Analytical and experimental study of the effects of flow characteristics and fluid viscosity upon the movement of bed-load in open channels. Ph. D. Thesis, University of Minnesota.
- [24] V. A. Vanoni, N. H. Brooks, J. F. Kennedy (1961): Lecture notes on sediment transportation and channel stability. California Institute of Technology, Report No. KH-R-1, Pasadena, California.
- [25] H. Rouse (1950): Engineering Hydraulics. John Wiley & Sons, Inc., New York, S. 794, 3. Aufl. 1961.
- [26] M. P. O'Brien (1933): Review of the theory of turbulent flow and its relation to sediment transportation.
- [27] H. Rouse (1937): Modern conception of the mechanics of fluid turbulence. «Trans. ASCE», Vol. 102, p. 534.
- [28] A. Vanoni (1953): A summary of sediment transportation mechanics. «Proc. Third Midwestern Conf. on Fluid Mechanics», p. 129/160.
- [29] H. A. Einstein und Ning Chien (1955): Effect of heavy sediment concentration near the bed on the velocity and sediment distribution. M. R. D. Sediment Series No. 8, Missouri River Div., Corps of Engineers.
- [30] E. W. Lane und A. A. Kalinske (1941): Engineering calculations of suspended sediment. «Trans. Am. Geophys. Union», p. 603/607, Bd. 22.
- [31] J. N. Hunt (1954): The turbulent transport of suspended sediment in open channels. «Proc. Royal Soc. London», Series A, Vol. 224, No. 1158, p. 322/335.
- [32] H. S. Bell (1942): Density currents as agents for transporting fine sediments. «Journal of Geology», Vol. I, No. 5, p. 512/547.
- [33] G. H. Keulegan (1944): Laminar flow at the interface of two liquids. U.S. National Bureau of Standards, RP 1591.
- [34] G. H. Keulegan (1949): Interfacial instability and mixing in stratified flows. U.S. National Bureau of Standards, RP 2040.
- [35] G. H. Keulegan (1953): Characteristics of internal solitary waves. U.S. National Bureau of Standards, RP 2442.
- [36] A. T. Ippen und D. R. Harleman (1952): Steady state characteristics of subsurface flow. U.S. National Bureau of Standards, Circular 521, p. 79/93.
- [37] E. W. Lane und A. A. Kalinske (1939): The relation of suspended to bed material in rivers. «Trans. A. G. U.», p. 637/641.
- [38] R. A. Bagnold (1956): The flow of cohesionless grains in fluids. «Royal Soc. London Trans.», Sec. A, Vol. 249, p. 235/297.
- [39] E. M. Laursen (1958): The total sediment load of streams. «Proc. ASCE», Hy-1, Vol. 84, p. 36.

- [34] D. C. Bondurant (1958): Discussion of Laursen's paper: The total sediment load of streams. «ASCE Proc.», Vol. 84, Hy-6.
- [35] R. J. Garde und M. L. Albertson (1958): Discussion of Laursen's paper. «ASCE Proc.», Vol. 84, Hy-6.
- [36] J. L. Bogardi (1958): Discussion of Laursen's paper. «ASCE Proc.», Hy-6.

- [37] W. Willi (1963): Anwendung einiger Geschiebtriebformeln auf den Rhein im Fussacher-Durchstich und den Niobara River bei Cody, Nebraska (U. S. A.), für den Fall gleichförmigen Abflusses und Geschiebetriebes. Int. Bericht J5, VAWE.

Siehe auch Seite 641!

Adresse des Verfassers: Jürg Zeller, dipl. Ing., Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH, Gloriastrasse 39, Zürich 6.

Das Kraftwerk Obermatt im Engelbergertal

DK 621.29

Am 29. Mai 1963 fand die offizielle Einweihung des erneuerten Kraftwerkes Obermatt im Engelbergertal statt, wozu der Verwaltungsrat des Elektrizitätswerks Luzern-Engelberg AG. Behörden und Gäste eingeladen hatte. Die Einweihung von Mensch und Werk kam durch den würdevollen Akt der Einsegnung der Anlagen ergreifend zum Ausdruck, die S. Gn. Abt Leonhard Bösch vom Stift Engelberg vornahm. Anschliessend gab der Verwaltungsratspräsident der Elektrizitätswerk Luzern-Engelberg AG., Stadtrat Robert Hodel, eine Rückschau über die bisherige Entwicklung; sie sei vorwiegend einer eingehenderen Beschreibung der neuen Anlagen auszugswise hier wiedergegeben, nachdem das alte Werk von Ingenieur Kilchmann s. Zt. ausführlich beschrieben worden war¹⁾.

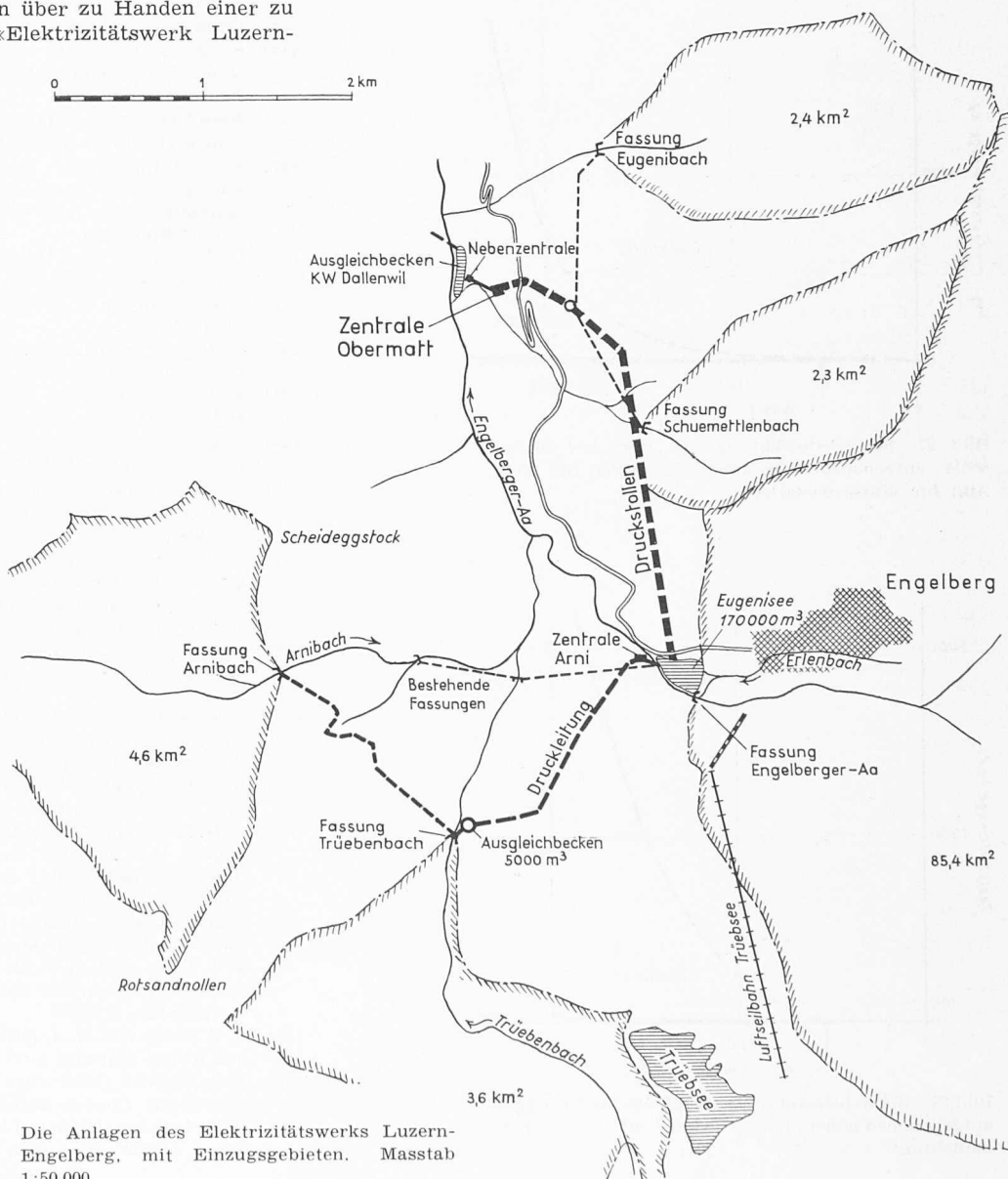
Schon zu Beginn dieses Jahrhunderts wurden die Wasserkräfte des Erlenbaches und der Engelberger Aa für die Erzeugung elektrischer Energie ausgebaut. Die erste Konzession erhielt Eugen Hess-Waser am 19. Juni 1901. Sie ging bald nachher an die Stadt Luzern über zu Händen einer zu gründenden Aktiengesellschaft «Elektrizitätswerk Luzern-Engelberg AG.», die die Ausnützung der im Engelbergertal vorhandenen Gewässer zur Erzeugung elektrischer Energie bezweckte und am 27. Januar 1903 gegründet wurde. Der bauliche Teil des ersten Kraftwerkes Obermatt wurde von den Ingenieuren Kilchmann und Studer, der elektrische von V. Troller, dem ersten Direktor des Elektrizitätswerkes Luzern, projektiert. Das Werk konnte am 2. Juni 1905 den Probebetrieb aufnehmen. Installiert waren vier Maschinengruppen, jede bestehend aus einer Freistrahlturbine von 2000 PS normaler Leistung (maximale Leistung 2500 PS) und einem Drehstrom-Generator von 1850 kVA und 6000 V, Drehzahl 300 U/min, von denen eine Gruppe als Reserve dienen sollte, sowie zwei Erregergruppen von je 175 PS Turbinenleistung und eine Gruppe von 600 PS für den Betrieb der Stansstad-Engelbergbahn. Die Ausbau-Wassermenge betrug 5,3 m³/s.

Das Werk, das für die damalige Zeit eine Pionierleistung darstellte, erreichte bereits im Jahre 1915 wegen kriegsbedingter Steigerung des Energiebedarfs seine Leistungsgrenze. Es gelang, unter Ueberwindung grösster Schwierigkeiten zwei weitere Maschinengruppen von je 4000 PS aufzustellen, die 1921 in Betrieb kamen und noch

¹⁾ Eine ausführliche Beschreibung von Ing. C. Kilchmann findet man in SEZ Bd. 48, S. 13, 25, 51, 95, 101 (1906).

heute verwendet werden. Im Winter 1962/63 hat man die Statorwicklungen dieser Maschinen zwecks Erhöhung des Wirkungsgrades erneuert und damit eine Leistungserhöhung um rd. 8 % erzielt.

Die ständig wachsende Nachfrage nach elektrischer Energie zwang zur genauen Prüfung der Frage, wie die verfügbaren Wasserkräfte bestmöglich genutzt und die überalterten Anlagen entsprechend erneuert werden können. Auf Grund eines generellen Projektes aus dem Jahre 1958, das die gemeinsame Nutzbarmachung der Engelberger Aa und ihrer Seitenbäche sowie des Trübsees umfasste, konnte nach Regelung der rechtlichen Belange die Bauausführung am 19. Mai 1959 beschlossen werden, und zwar vorerst für einen Ausbau mit einer Nutzwassermenge von 11 m³/s. Dazu mussten ein neuer Druckstollen und eine dritte Druckleitung erstellt werden. Mit dem Stollenvortrieb wurde im November 1959 begonnen.



Die Anlagen des Elektrizitätswerkes Luzern-Engelberg, mit Einzugsgebieten. Masstab 1:50 000.