

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 83 (1965)
Heft: 42: Prof. G. Schnitter zum 65. Geburtstag, 1. Heft

Artikel: Versuche der VAWE über die Erosion in kohärenten Gerinnen
Autor: Zeller, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-68282>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 23.02.2026

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

Prof. G. Schnitter zum 65. Geburtstag

Am 25. Oktober dieses Jahres feiert Prof. Gerold Schnitter seinen 65. Geburtstag. Es ist dies ein willkommener Anlass, um ihm wieder einmal vor Augen zu führen, wie sehr seine bisherige Lebensarbeit auch in Fachkreisen anerkannt und bewundert wird. Ähnlich wie sein Vorgänger an der ETH, Prof. Dr. E. Meyer-Peter, hat auch Prof. Schnitter in seinem Beruf von der Pike auf gelernt. Seine Lehr- und Wanderjahre verbrachte er zum Teil im Ausland (Italien und Jugoslawien), und er erwarb sich dabei neben wertvollen Erfahrungen auf allen Gebieten des Bauingenieurwesens den Weitblick, der seine Tätigkeit auch nach der Rückkehr in die Heimat befriedigte. Er musste sich «terre à terre» mit den bautechnischen Aufgaben auseinandersetzen, deren Behandlung er den ihm anvertrauten Studierenden als Hochschullehrer näher zu bringen wusste. Mit grosser Freude und Hingabe hat er vor 13 Jahren die Lehrtätigkeit an der ETH aufgenommen, um sein reiches theoretisches Wissen und seine grosse praktische Erfahrung einer kommenden Ingenieurgeneration zu übermitteln. Prof. Schnitter ist aus dem vollen

Ingenieurleben herausgewachsen, er kennt aus eigener Erfahrung all die Schwierigkeiten und Imponderabilien, die mit der Führung eines grossen Bauplatzes verbunden sind. Mit unbestechlicher Objektivität hat er eh und je seine Lehr- und Expertentätigkeit ausgeübt, abhold aller sturen Dogmatik, mit einem «common sense», der allen schwierigen Fragen in einfacher, klarer Weise auf den Grund geht.

Wir freuen uns, durch das vorliegende Heft Professor Schnitter ein bescheidenes Zeichen unserer Würdigung der von ihm geleisteten grossen Ingenieurarbeit darbieten zu können und ihm gleichzeitig zu versichern, dass wir auch seine menschlichen Qualitäten des Herzens und des Geistes, die sich trotz seiner rastlosen Tätigkeit in keiner Weise vermindert haben, in höchstem Mass zu schätzen wissen. Wir wünschen ihm auch in den kommenden Jahren eine glückhafte Fortsetzung seiner fruchtbaren Tätigkeit als Ingenieur, als Lehrer und als weltweit anerkannter Experte, die er in Gemeinschaft mit seiner Gattin in bester Gesundheit weiterführen möge!

Arthur Winiger

Als Kurskameraden des Jubilars haben wir es unternommen, unserm lieben Freund zu seinem Geburtstag ein Sonderheft zu gestalten, in welchem einige von den vielen Fachkollegen zu Worte kommen, mit denen

er zusammen arbeitete. Wir danken allen Autoren herzlich für ihre Mitwirkung an dieser Festgabe, und besonders auch Kollege Dr. Winiger dafür, dass er das Vorhaben durch sein Patronat gefördert hat. Die herz-

lichsten Wünsche der Autoren dieser Beiträge wie auch der Kurskameraden begleiten unsren treuen und stets hilfsbereiten Kollegen weiterhin.

Ernst Stambach
Werner Jegher

Versuche der VAWE über die Erosion in kohärenten Gerinnen

DK 551.311.21.001.6

Von J. Zeller, dipl. Ing. ETH, Chef der hydraulischen Abteilung der VAWE, Zürich

Vorbemerkungen des Verfassers

Wie wohl den meisten Lesern bekannt ist, beschäftigt sich die Wasserbauabteilung der VAWE mit hydraulischen Untersuchungen im Modell. Von solchen Arbeiten wird in den Fachzeitschriften immer wieder berichtet. Wir wollen nicht auch noch über diesen wesentlichen Bereich unserer Tätigkeit schreiben, sondern ein Beispiel der angewandten Forschung herausgreifen, das uns seit dem Herbst 1958 beschäftigt und verspricht, in weiterer Zukunft interessante Ergebnisse zu zeitigen.

1. Einleitung

Unsere Flüsse nehmen ihren Weg vorwiegend durch Gebiete fluvialer Ablagerungen, in denen Kies-Sand-Materialien, d. h. sogenannte Geschiebe, überwiegen. Doch kommt es immer wieder vor, dass auch feinkörnige Materialien von kohärentem Charakter das Gerinne bilden. Es können dies Seebodenlehme, Gehängelehme, verkittete Moränen, Mergel usw. sein. Ein genaueres Studium unserer Flussläufe und Kanäle zeigt, wie relativ häufig lehmige Gerinnestrecken auftreten. Ja, man hatte in den letzten Jahren in vermehrtem Masse solche Strecken wegen Erosionsschäden zu verbauen. (Bild 1)

Untersucht man in europäischen und aussereuropäischen Ländern die Anschauungen über den Mechanismus der Tonerosion und die Verbaumethoden, so findet man die widersprüchlichsten Auffassungen. Auf der einen Seite scheinen Lehmstrecken überhaupt keine Probleme zu stellen und auf der anderen Seite sind sie wiederum so gross, dass überhaupt kaum technische Hilfsmittel zu genügen schei-

nen, um der fortschreitenden Gerinnezerstörung Einhalt zu gebieten. Diese Widersprüche schaffen Unsicherheit. Grundsätzlich besteht Übereinstimmung darin, dass die Kenntnisse über den Sedimenttransport nichtkohärenter Materialien («Geschiebetrieb»), wie wir ihn ganz allgemein im Flussbau anwenden, nicht genügen, sondern weitere Faktoren eine ganz wesentliche Rolle spielen.

Da wir mit einer fortschreitenden Veränderung im Wasser- und Geschiebehaushalt unserer Flüsse auch in weiterer Zukunft rechnen müssen, gilt es, rechtzeitig abzuklären, ob die Tonstrecken schweizerischer Flüsse erosionsgefährdet sind und wenn ja, mit welcher Abtragsgeschwindigkeit zu rechnen ist und schliesslich, wie dieser Abtrag verhindert oder doch in zulässigen Grenzen gehalten werden kann. Die VAWE hat sich deshalb zum Ziele gesetzt, das Phänomen der Tonerosion etwas auszuleuchten und zu analysieren. Sie ist sich dabei allerdings bewusst, dass der Weg lang und mühsam sein wird und dass eventuell nur Teilergebnisse erwartet werden können.

Da diese Erosionsfragen bis heute im deutschen, französischen und englischen Schrifttum noch wenig Beachtung fanden, wollen wir nachfolgend eine Einführung in die Problematik der Tonerosion versuchen.

2. Ergebnisse einiger Voruntersuchungen

In erster Linie gilt es, festzustellen, wo die Unterschiede zu den Anschauungen des Geschiebetriebes zu suchen sind und welches die charakteristischen Merkmale bzw. die wichtigsten Parameter sein

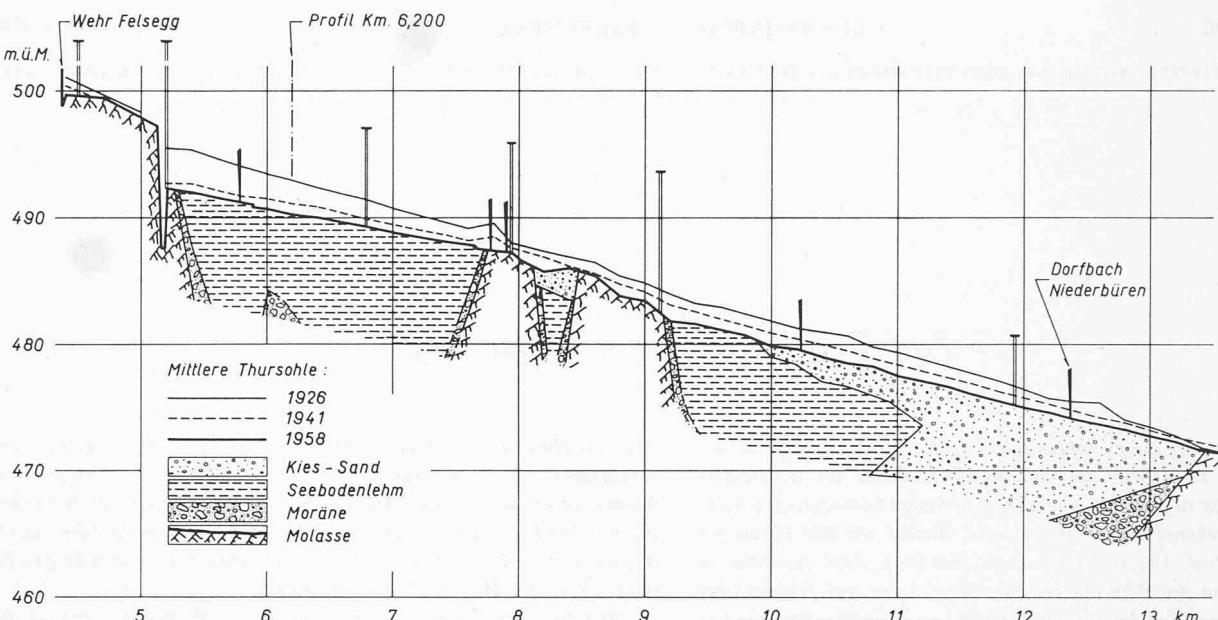


Bild 1. Vereinfachtes geologisches Längenprofil (Längen 1:60 000, Höhen 1:600) der Thurverbaustrecke Schwarzenbach—Niederbüren nach Dr. H. Jäckli und typisches Querprofil (Längen und Höhen 1:600) einer Lehmstrecke mit eingetragenen Sohlenlagen der Jahre 1926, 1941 und 1958 (Baudepartement des Kantons St. Gallen)

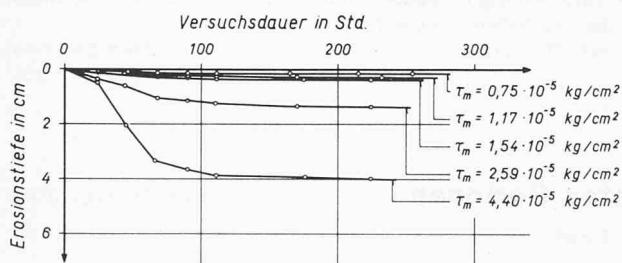


Bild 2. Gerinne-Erosion: Zeit-Erosions-Diagramme von Versuchen in der Laborrinne für verschiedene mittlere Schleppspannungen τ_m bei sonst gleichbleibenden hydraulischen und bodenmechanischen Randbedingungen unter Berücksichtigung des Quellens (Wassergehalt beim Einbau $w_a = 33,6 \div 34,5\%$, bei Versuchsende $w_e = 36,6 \div 37,4\%$, Flügelscherfestigkeit beim Einbau $\tau_f = 0,126 \div 0,129 \text{ kg/cm}^2$, bei Versuchsende $\tau_f = 0,108 \div 0,111 \text{ kg/cm}^2$)

könnten, die die Tonerosion bestimmen. Hierbei sollte von allem Anfang an die Untersuchung auf den Fall beschränkt bleiben, bei dem von Oberstrom kein Fremdmaterial (Kies, Sand usw.) in die Versuchsstrecke transportiert werde, d. h. man setzt voraus, der Fluss befände sich in «eigener Alluvion» und die Flussohle sei ständig mit Wasser überdeckt. In Anlehnung an die im Labor bis ins Detail studierten Geschiebetriebvorgänge baute man sinngemäss in eine Versuchsrinne Ton ein und untersuchte die Wirkung des fliessenden Wassers auf die Tonsohle. Diese Untersuchungen dauerten 3 Jahre¹⁾. Anschliessend prüfte man die Kolkbildung unterhalb eines Wehres in Anlehnung an frühere Versuche mit Sand als Sohlenmaterial²⁾. Mit Hilfe dieser beiden Versuchstypen («Erosionsversuche» und «Kolkversuche»), auf deren Ergebnisse wir nachfolgend etwas eintragen wollen, ist es möglich, den Mechanismus sowohl grossflächiger Erosionen als auch lokaler Kolke kennen zu lernen und generell zu beurteilen.

¹⁾ N. M. Abdel-Rahman (1963): The effect of flowing water on cohesive beds. VAWE-Mitteilung Nr. 56.

²⁾ W. Eggenberger und R. Müller (1944): Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Kolkproblem. VAWE-Mitteilung Nr. 5.

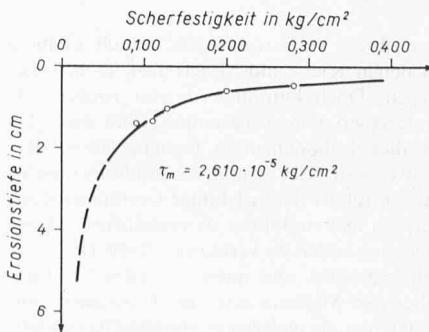


Bild 3. Gerinne-Erosion; Enderosionstiefe in Abhängigkeit der Schleppspannung τ_m (diese Versuche sind identisch mit denjenigen von Bild 2)

Bild 4. Gerinne-Erosion: Enderosionstiefe in Abhängigkeit der Flügelscherfestigkeit des Tonnes bei gleichbleibender Schleppspannung τ_m

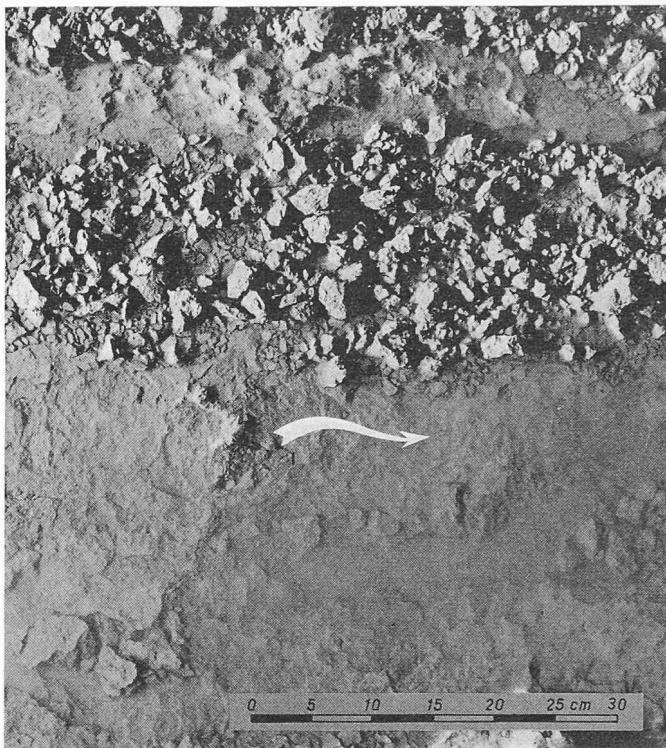
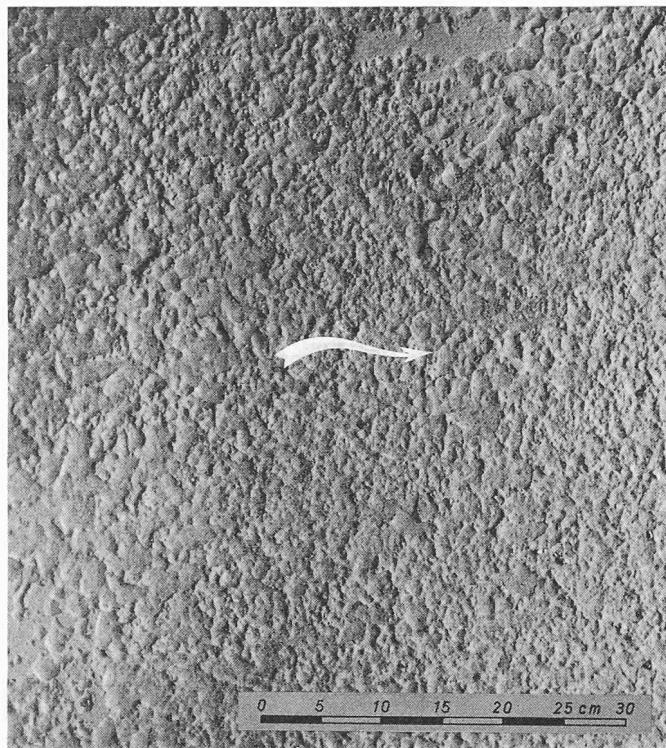


Bild 5a und 5b. Gerinne-Erosion: Oberflächenbeschaffenheit der Gerinnesohle; links: kurz nach Versuchsbeginn, rechts: bei Versuchsende (Strömungsrichtung von links nach rechts)

Als Ton wurde in sämtlichen Vorversuchen der in Pulverform erhältliche Opalit verwendet³⁾.

Erosionsversuche in der Laborrinne⁴⁾

Zur Erläuterung der Versuchsergebnisse diene Bild 2. Es zeigt, dass die Gerinnesohle sich vorerst schnell und dann immer langsamer eintieft und einer Endlage zustrebt. Dieses Abklingen der Erosion ist überraschend, da die hydraulischen Kräfte im Versuch praktisch gleichblieben und im allgemeinen auch die bodenmechanischen Eigenschaften nur wenig änderten, es deshalb scheinbar keine Ursache gibt, die den Erosionsvorgang bremsen und schliesslich zum Anhalten bringen könnte.⁵⁾ Weiter ist zu erkennen, dass die Erosionsstiefe von der hydraulischen Beanspruchung (in Bild 3 dargestellt durch die Schleppspannung) und von den Festigkeitseigenschaften des Tones (Bild 4) abhängt. Es ist demnach nicht mehr wie beim Geschiebetrieb (Kiessand) praktisch die Kornverteilung allein massgebend, sondern nun auch die Scherfestigkeit und noch andere, nicht erfasste Größen.

³⁾ Bodenmechanische Eigenschaften des Opalites (Opalinuston von Holderbank):

Atterberggrenzen: $w_L = 42,0 \div 44,0\%$, $w_p = 18,0 \div 20,0\%$

Spezifisches Gewicht: $\gamma_s = 2,60 \div 2,65 \text{ t/m}^3$, Karbonatgehalt 6 %

Anlieferungswassergehalt (getrocknet, gemahlen) $w = 4\%$

Kornverteilung (Mahlfeinheit): $d_{10} = 0,0006 \div 0,0009 \text{ mm}$,

$d_{50} = 0,007 \div 0,010 \text{ mm}$

$d_{90} = 0,050 \div 0,120 \text{ mm}$

⁴⁾ Abmessungen der Rinne: Nutzlänge 10,0 m, Breite 0,90 m, Tiefe 0,60 m, untersuchte Tonstrecke 6,0 m, Stärke der eingebauten Tonschicht 0,07 m, mittl. Sohlgefälle $J_s = 5^\circ/\text{oo}$, eigener Wasserkreislauf.

⁵⁾ Bei Kiessand als Alluvialmaterial und voll ausgebildetem Geschiebetrieb senkt sich die Gerinnesohle i. d. R. parallel, mit gleichbleibender Abtraggeschwindigkeit. Siehe W. Willi (1965): Zur Frage der Sohlenerosion bei grossen Gefällen, VAWE-Mitteilung Nr. 68, oder der Geschiebetrieb ist nicht voll ausgebildet, so dass sich nach einer gewissen Zeit eine abgeplasterte Flussohle ausbildet, die den Erosionsvorgang bremst und schliesslich zum Anhalten bringt (siehe J. Gessler (1965): Der Geschiebetriebbeginn für Mischungen, untersucht an natürlichen Abpfälsterungserscheinungen in Kanälen, VAWE-Mitteilung Nr. 69).

Was die Scherfestigkeit anbetrifft, so zeigte es sich, dass, je nach Einbaubedingungen, der Ton während des Versuches im allgemeinen eine Festigkeitsabnahme durchmachte. Da der Ton bei diesen Versuchen aus praktischen Gründen mit Hilfe künstlicher Verdichtung (Proctor Standard bei $w > w_{opt}$) eingebaut⁶⁾ wurde, er sich deshalb mit der Zeit zu sättigen (und zu quellen) begann, ist diese Scherfestigkeitseinbusse nichts Aussergewöhnliches. Jedoch kann nichts darüber ausgesagt werden, ob diese Einbusse zusätzlich durch die hydrodynamische Beanspruchung des fliessenden Wassers im Sinne einer Festigkeitszu- oder -abnahme mitbeeinflusst wird. Entsprechende Versuche zeitigten bis heute keine schlüssigen Resultate. Dennoch weist vieles darauf hin, dass an Stellen starker hydraulischer Beanspruchung sich eine auf die Tonoberfläche beschränkte Verfestigung einstellt.

Durch den Erosionsvorgang verändert sich auch die Oberflächengestalt der Tonsohle (Bilder 5a und 5b). Es mag auffallen, dass mit

⁶⁾ «Künstliche Verdichtung» heisst in diesem Zusammenhang, dass der Ton durch Einstampfen in die Rinne in einen Zustand höherer Festigkeit übergeführt wurde. Auf diese Weise wurden die Parameter Porosität und Scherfestigkeit auf die gewünschte Grösse gebracht bzw. variiert. Demgegenüber ist die später erwähnte «Konsolidation» ein Hilfsmittel, um durch ausschliesslich statische Belastung die gewünschten Festigkeitseigenschaften zu erreichen.

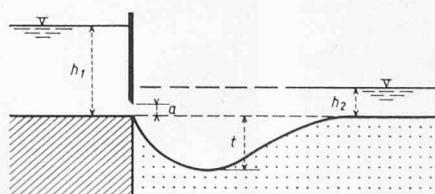


Bild 6. Kolkversuche: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung. Hydraulische Daten: $q = 11,29 \text{ l/sec m}$, $h_1 = 15,80 \text{ cm}$, $h_2 = 5,20 \text{ cm}$, $a = 1,09 \text{ cm}$

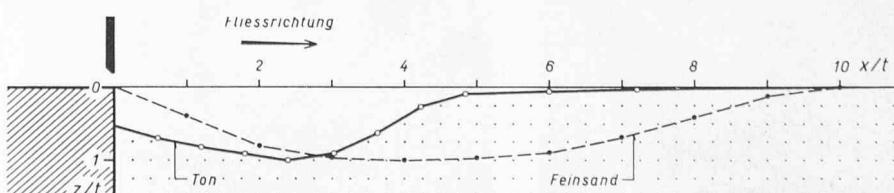


Bild 7. Kolkversuche: Kolkform für einen Feinsand und einen Ton (Opalit) in Relativwerten bezogen auf die maximale Koltiefe t . Kornverteilung des Sandes: $d_{10} = 0,38 \text{ mm}$, $d_{50} = 0,52 \text{ mm}$, $d_{90} = 0,73 \text{ mm}$; Endwassergehalt des Tonens $w_e = 42,5\%$

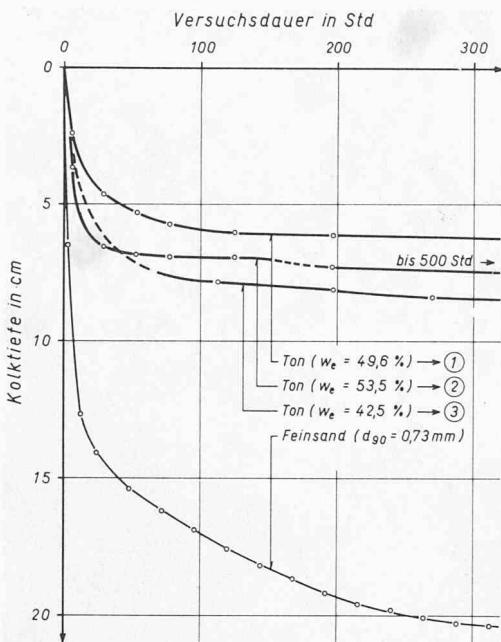


Bild 8. Kolkversuche: Maximale Kolktiefe t in Abhängigkeit der Versuchsdauer für Ton (Opalit) und Feinsand

Versuch (1): $w_a = 50,8\%$, $w_e = 49,6\%$, $\tau_{fa} = 0,009 \text{ kg/cm}^2$, $\tau_{fe} = 0,0096 \text{ kg/cm}^2$ (Flügelscherfestigkeit bei Versuchsbeginn bzw. Versuchsende)

Versuch (2): $w_a = 53,7\%$, $w_e = 53,5\%$, $\tau_{fa} = 0,0067 \text{ kg/cm}^2$, $\tau_{fe} = 0,0076 \text{ kg/cm}^2$

Versuch (3): $w_a = 41,9\%$, $w_e = 42,5\%$, $\tau_{fa} = 0,013 \text{ kg/cm}^2$, $\tau_{fe} = 0,0130 \text{ kg/cm}^2$

zunehmender Schleppspannung nicht nur die Erosionstiefe, sondern auch die Sohlenunebenheiten («Rauigkeit») sich stark vergrössern (Bild 3). Ein enger Zusammenhang zwischen Erosionstiefe (Abtrag) und Rauigkeit scheint zu bestehen. Allerdings ist kaum anzunehmen, dass diese Rauigkeit sich mit weiter anwachsender Schleppspannung beliebig vergrössert. Obwohl grundsätzlich auch bei Tonsohlen im zweidimensionalen Versuch ein sogenannter Erosionsbeginn (entsprechend dem Geschiebetriebbeginn) festzustellen ist, dürfte ein solcher in der Flussbaupraxis nicht immer vorhanden sein, da bei sehr kleiner Wasserführung sich das Wasser in kleinen und grösseren Rinnen sammelt und dort die Erosion weiter fortschreitet.

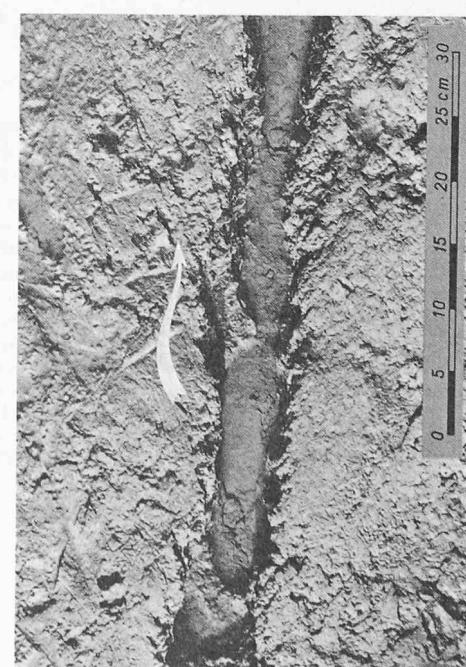
Bild 9. Kolkversuch: Kolkwanne von oben, mit sechs lokalen Erosionsmulden



Bild 10. Kolkversuche: Detailaufnahme eines seitlichen Kolkloches von oben



Bild 11. Gerinne-Erosion: Ausschnitt einer lokalen Erosionsrinne von oben



Kolkversuche

Die Versuchsanordnung ist in Bild 6 wiedergegeben, ebenso die hydraulischen Daten. Im Gegensatz zu den früheren Versuchen wurde, zur Vermeidung der ungünstigen Wirkung der künstlichen Verdichtung, der Ton in praktisch gesättigtem Zustand (unkonsolidiert) eingebaut. Der Abfluss unterstrom der Schütze ist «bedeckt gewellt». Die erhaltene Kolkform ist beim Ton anders geartet als beim Sand (Bild 7). Anstelle einer Abhängigkeit der Kolkabmessungen von maximaler Korngrösse, Kornverteilung und unter Umständen der Lagerungsdichte (letztere ist nur massgebend für die Erosionsgeschwindigkeit, nicht aber für die Kolkform) tritt wiederum wie bei den vorangegangenen Versuchen eine solche der Gesamtheit der bodenmechanischen Eigenschaften. Der zeitliche Ablauf des Kolkvorganges bleibt jedoch grundsätzlich ähnlich wie beim Sand (Bild 8).

Auf ein Phänomen, das besonders bei den Kolkversuchen augenfällig in Erscheinung tritt, ist aufmerksam zu machen: sekundäre Strömungsvorgänge, deren Wirkung bei Kiessandmaterialien kaum spürbar, jedoch bei sehr feinkörnigen kohärenten und nichtkohärenten Sohlenmaterialien zu berücksichtigen sind. So zeichnen sich in der Kolkwanne obiger Versuche zusätzliche Mulden ab, die durch Sekundärströmungsvorgänge verursacht werden. In Bild 9 sind deutlich 6 solche Mulden erkennbar⁷⁾. Weiter wirken sich auch Ablösungswirbel sehr ungünstig aus. In Bild 10 zeichneten sich die Spuren eines durch die Schützenut entstandenen Ablösungswirbels ganz deutlich in Form einer Art «Gletschermühle» ab, deren Tiefe zweimal grösser war als diejenige der eigentlichen Kolkwanne. Weiter verursachte eine hydraulische Asymmetrie am Gerinneeinlauf («Erosionsversuche») eine schluchtähnliche Rinne von rd. 6 cm Breite und mehr als 5 cm Tiefe (Endzustand nicht abgewartet), die sich ungefähr der Gerinneckse folgend durch die ganze Tonversuchsstrecke zog (Bild 11). Solche Phänomene sind auch von Bedeutung bei flussbaulichen Arbeiten und sollten gebührend beachtet werden, fielen doch solchen Effekten eine ansehnliche Zahl von Verbauungen des Auslandes zum Opfer.

Nicht nur schwierige hydraulische Probleme treten auf, sondern auch solche *bodenmechanischer* Art. Abgesehen davon, dass die im Verhältnis zur Scherfestigkeit des Tones angreifenden äusserst kleinen hydraulischen Erosionskräfte überhaupt eine Erosion verursachen können, wurde beim Kolkversuch festgestellt, dass trotz abnehmender Scherfestigkeit des Tones (zunehmender Wassergehalt) aber sonst gleichbleibender Randbedingungen die Kolktiefe vorerst bis zu einem

⁷⁾ Hydraulische Daten des Oberwassers: Wassertiefe 15,8 cm, Gerinnebreite 90,0 cm, «Sekundärströmungswalzen» 6 (parallel zur Gerinneckse) einschichtig, durch Färbeversuche nachgewiesen.

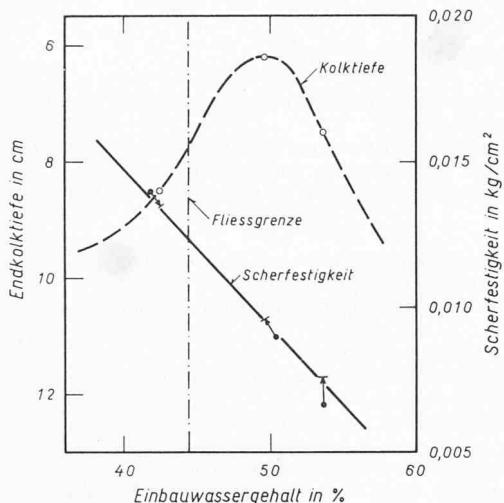


Bild 12. Kolkversuche: Endkolk Tiefe t in Abhängigkeit der Tonscherfestigkeit

Minimum abnimmt, um dann nach weiterer Steigerung des Einbauwassergehaltes sehr stark zuzunehmen⁸⁾ (Bild 12), ein Vorgang, der in engem Zusammenhang mit der Rheologie des Tones steht. Auch wurde, wie bereits erwähnt, beobachtet, dass entlang der Tonoberfläche hydraulisch stark beanspruchte Teile (z. B. kleine Buckel, Höcker usw.) örtlich eine etwas grössere Tonfestigkeit aufwiesen als die benachbarten Mulden und Senken, obwohl bei Versuchsbeginn der Ton sehr homogen eingebaut wurde.

Zusammenfassend wollen wir festhalten, dass die hydraulischen Kräfte in ihrer Wirkung auf die Tonerosion viel feiner berücksichtigt werden müssen, als wir dies beim Geschiebetrieb im allgemeinen gewohnt waren, und dass die Beurteilung der Widerstandsfähigkeit des Tones gegen Erosion viel detaillierter Kriterien bedarf als dies bei den nichtkohärenten Lockergesteinsmaterialien (Geschiebe) der Fall ist, noch detaillierter offenbar, als wir dies im allgemeinen in der Bodenmechanik benötigen.

3. Die an der VAWE angelaufenen Grundlagenuntersuchungen

Die geschilderte Vielfalt von Erscheinungen und Eindrücken ist nun zu sichten und zu ordnen. Vieles ist relativ leicht verständlich, anderes scheint dagegen ersteres wiederum zu widerlegen. Wir sehen uns deshalb veranlasst, uns an die wirklichen Vorgänge heranzutasten und uns wenn möglich mit der Zeit ein Gedankenmodell zurechtzu-

⁸⁾ Im Gegensatz zu den «Erosionsversuchen» an künstlich verdichteten Ton handelt es sich in diesem Falle um unkonsolidierten (gestörten) Opalit, der etwa bei der Fließgrenze eingebaut wurde, d. h. praktisch gesättigt ist.

zimmern, das wir schrittweise an die tatsächlichen Verhältnisse anzupassen haben. Wenigstens andeutungsweise wollen wir nachfolgend auf die Grundvorstellung eingehen, die das Versuchsprogramm bestimmte.

Der Erosionsvorgang in tonigen Materialien zerfällt in zwei Phasen, nämlich:

1. Loslösen der Tonteilchen
2. Abtransport dieser Tonteilchen.

Das *Loslösen* der Teilchen ist in erster Linie auf die wirkenden hydromechanischen und -dynamischen Kräfte des fließenden Wassers zurückzuführen. Als diesem Vorgang entgegenwirkt gelten die bodenmechanischen Kräfte des Tones. Diese bodenmechanischen Kräfte können aber nicht nur passive Widerstandskräfte sein, sondern je nach den sich im Ton abspielenden chemisch-physikalischen Vorgängen, den Abtrag beschleunigen oder verzögern.

Der *Abtransport* der losgelösten Teilchen erfolgt nach dem aus den Geschiebetreibuntersuchungen beobachteten Mechanismus, den wir als bekannt voraussetzen dürfen⁹⁾, wobei die losgelösten Tonteilchen wie auch die Gerinnesohle einem starken Abrieb ausgesetzt sind. Demzufolge ist mit einem ins Gewicht fallenden Schwebstofftransport zu rechnen mit allen hydromechanischen und -dynamischen Folgen¹⁰⁾.

Betrachten wir die für das Loslösen der Tonteilchen verantwortlichen *hydraulischen Kräfte* etwas näher, so können wir feststellen, dass u. a. einmal die allgemein bekannte mittlere Schleppkraft bzw. -spannung τ_m eine massgebende Größe darstellt, welche für gleichförmigen Abfluss im offenen Gerinne näherungsweise zu $\tau_m = \gamma_w \cdot R \cdot J_e \approx \gamma_w \cdot h \cdot J$ angenommen wird (breite Gerinne). Hiezu kommen die infolge Turbulenz hervorgerufenen Druck- und Schleppspannungskonturen, die durch ihr pulsationsförmiges Auftreten die Tonsohle zusätzlich beanspruchen. Sobald sich genügend grosse Sohlenunebenheiten ausgebildet haben, sind die infolge von Ablösungsscheinungen veränderten Kräfte zu berücksichtigen, die ebenfalls pulsierenden Charakter aufweisen.

Auf der anderen Seite sind die *Kräfte in der Tonsohle* selbst zu betrachten. Untersuchen wir dieses Ton-Porenwasser-System, so ist es naheliegend, als eines der massgebenden Kriterien die Scherfestigkeit, d. h. die maximale Schubspannung bei Bruch τ_f als repräsentativ herauszustellen. Man zerlegt τ_f gewöhnlich in einen Kohäsions- und einen Reibungsanteil von der Form

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg} \Phi' \text{ mit in unserem Falle } u = u_m \pm \Delta u.$$

⁹⁾ J. Zeller (1963): «Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne», VAWE-Mitteilung Nr. 62.

¹⁰⁾ In den Versuchen wurde festgestellt, dass grosse Schwebstoffkonzentrationen immer in Verbindung mit starkem Tonabtrag stehen. Nachdem sich hinsichtlich Erosion ein Beharrungszustand eingestellt hat, nimmt die Konzentration je nach Sedimentart stark ab.

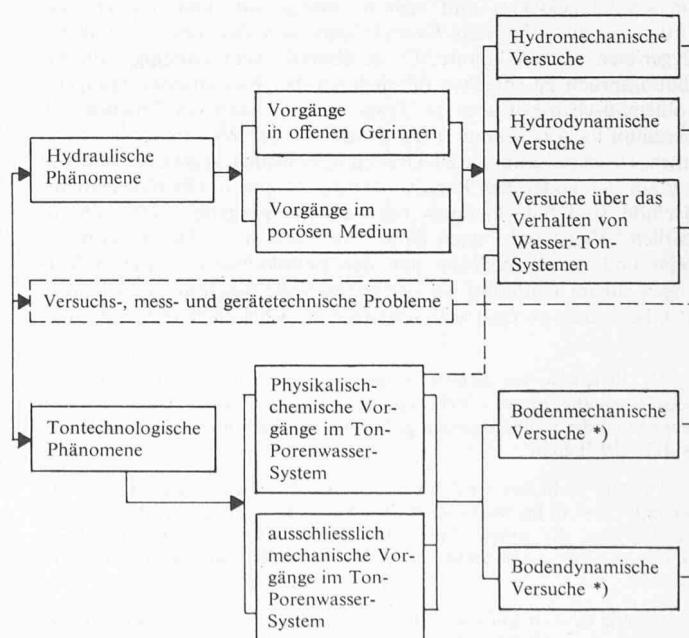


Tabelle 1. Hauptgebiete der Untersuchungen

Tabelle 2: Generelle Angaben über die Art der laufenden Arbeiten

Untersuchungsgebiet	Ziel der Arbeiten	Vorgehen und Versuchseinrichtungen
Hydromechanische Untersuchungen *)	Abtrag als Funktion der hydraulischen und tontechnologischen Randbedingungen	Kolkversuche (Absturz über Wehrschwelle) in Rinne mit eigenem Kreislauf, 0,90 m breit, 12,0 m totale Länge. Grossflächige Erosionsversuche in Rinnen mit eigenem Kreislauf, 0,60 m breit, 19,0 m totale Länge, entlüfteter Ton, auf ganzer Rinnenlänge zwischen 0,0 und 5,0 kg/cm ² konsolidierbar, spezielle Wasserentsalzungsanlage.
Hydrodynamische Untersuchungen *)	Hydraulische Vorgänge und Kräfte in Sohlennähe	Entwicklung und Bau von Feinstmessgeräten und deren Eichung. Theoretische und versuchstechnische Grenzschicht- und Turbulenz-Untersuchungen an stark idealisierten und an natürlichen Gerinnesohlen.
Untersuchungen über das physikal. Verhalten von Wasser-Ton-Systemen	Hydraulische Eigenschaften von Ton-suspensionen und deren Stabilität	Spezifisches Gewicht, Viskosität etc. Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Schwebstoffart, der Konzentration und der Fließbedingungen. Rheologie von Suspensionen geringer Konzentration.
Bodenmechanische Untersuchungen	Mechanische Festigkeitseigenschaften in Oberflächennähe und deren Beeinflussung durch physikalisch-chemische Vorgänge	Ton- und Tonteilchenstrukturanalysen verschiedener Tone. Ionen austauschreaktionen und deren Zusammenhang mit den Festigkeitseigenschaften. Einfluss der «Chemie» des Gerinnewassers auf die Festigkeitseigenschaften Bodenmechanische Vorgänge in Oberflächennähe.
Bodendynamische Untersuchungen	Festigkeitseigenschaften der Tonoberfläche unter dynamischer (pulsierender) Beanspruchung	Scherfestigkeit unter dynamischer Beanspruchung im isotropen Halbraum (dynamischer Triaxialapparat) Festigkeitsveränderungen unter dynamischer Oberflächenbeanspruchung an der Kontaktfläche Wasser-Ton.

*) im Sinne der in der Bodenmechanik gebräuchlichen Einteilung.

Da die totale Normalspannung σ für eine Stelle nahe der Oberfläche näherungsweise identisch ist mit der Wasserauflast, und man annehmen kann, dass die Porenwasserspannung u genügend Zeit hat, sich den mittleren äusseren Druckverhältnissen anzupassen, so gilt näherungsweise $\sigma = u_m$, d. h. $\tau_f = c' \pm u \Delta \cdot \operatorname{tg}\phi'$. Hieraus folgt für kleine Δu -Werte, dass die Scherfestigkeit in erster Linie von der Kohäsion abhängt. Nehmen wir die früher erwähnten Vorversuche zu Hilfe und stellen die hydraulischen den bodenmechanischen Kräften gegenüber, so ist wegen der grossen Unterschiede zwischen angreifenden und widerstehenden Kräften¹¹⁾ augenfällig, dass allein mit einer derartigen Betrachtungsweise nicht durchzukommen ist. Man sieht sich deshalb veranlasst, einige Grundbegriffe vor allem der Bodenmechanik in dieser Hinsicht neu zu überdenken, besonders was die Kohäsion anbetrifft¹²⁾. Hinsichtlich der dynamischen Beanspruchung des Tones darf angenommen werden, dass die angreifenden dynamischen Kräfte im Verhältnis zu den mechanischen Kräften gering sind; dass jedoch deren Frequenzen evtl. im Bereich der Eigenfrequenz des Tones liegen. (Letztere Annahme ist noch zu belegen). Bei genauer Beobachtung der Gerinnesohle während des Erosionsvorganges konnte ausserdem festgestellt werden, dass die Tonteilchen vorerst im Tonverband gelockert und hierauf solange auf- und niederbewegt wurden, bis auch die letzte Kontaktfläche sich löste und das Teilchen weggerissen werden konnte. Es ist deshalb nicht abwegig, von Ermüdungsbruch zu sprechen (ähnlich wie bei Kavitationsvorgängen). Problematisch bleibt aber die Frage, warum solch ein Teilchen sich überhaupt lockern konnte. Führten die von der Wasserveite her wirkenden Druckpulsationen zu Druckunterschieden gegenüber den nur langsam sich ändernden Porenwasserspannungen in Oberflächennähe, oder/und sind Schwingungs- oder andere Vorgänge dafür verantwortlich? Vieles weist auch darauf hin, dass u. a. der Struktur des Tones und der Tonteilchen und den physikalisch-chemischen Vorgängen, die im Ton selbst vor sich gehen, volle Beachtung zu schenken ist¹³⁾, besonders als man z. B. feststellte, dass bei nicht vollgesättigten,

¹¹⁾ Beispielsweise betrug beim untersuchten Ton die gemessene oberflächennahe Flügelscherfestigkeit 0,11 kg/cm² ($c' \approx 0,04$ bis 0,06 kg/cm²) und die Schleppspannung, bei der Erosion eintrat, $\tau_m = 0,75 \cdot 10^{-5}$ bis $4,4 \cdot 10^{-5}$ kg/cm².

¹²⁾ Die Kohäsion wird für praktische Zwecke meist als Ordinatenabschnitt ($\sigma = 0$) im Mohr'schen Bruchdiagramm definiert, ist somit eine Rechengrösse, die unter Umständen wenig mit der wahren Kohäsion eines Tonteilchengitters zu tun hat (c' ist in Wirklichkeit eine «rheologische Grösse»).

¹³⁾ Wir denken speziell an Ionenaustauschreaktionen im Zusammenhang mit den zwischen den Tonteilchen wirksamen elektrostatischen Kräften unter Berücksichtigung des an den Tonteilchen adsorbierten Wassers («diffuse double layer»).

künstlich verdichteten Tonen, wie sie in vielen Erosionsversuchen verwendet wurden, in stehendem Wasser sich ein ausserordentlich rascher Zerfall der Tonoberfläche einstellte.

Die Untersuchungen haben deshalb die in Tabelle 1 wiedergegebenen Hauptgebiete zu umfassen.

Es wäre nun sehr interessant, auf die einzelnen Untersuchungsarbeiten einzugehen, die Versuchseinrichtungen zu erläutern und die ersten Versuchsresultate zu diskutieren. Leider würde dies den Rahmen unserer Abhandlung bei weitem sprengen, so dass wir uns mit den in Tabelle 2 gemachten generellen Angaben über die Art der laufenden Arbeiten bis auf weiteres begnügen müssen. Dennoch ist beim Studium dieser Zusammenstellung spürbar, welch riesiger Umfang eine solche Untersuchung annehmen kann und wieviele Fachgebiete mitbestimmend sind, um zum gesteckten Ziel zu gelangen. Es wird deshalb eine der Hauptaufgaben darin bestehen, immer wieder Wichtiges von Unwichtigem zu trennen und die Untersuchung auf das Wesentliche zu konzentrieren.

4. Schlussbemerkungen

Manchem Leser wird auffallen, dass, obwohl es sich um ein Sedimenttransportproblem handelt, ein Problem also, mit dem sich vor allem der Hydrauliker zu befassen hat, sehr viele nicht hydraulische Fragen zu beantworten sind, ja, dass der Bodenmechanik im weitesten Sinne grosse Bedeutung zukommt. Dies ist wohl einer der Hauptgründe, warum systematische Untersuchungen erst vor wenigen Jahren aufgenommen wurden. Die tontechnologische Seite des Problems wird dabei nicht leicht zu lösen sein, da, wie es scheint, fundamentale Fragen im Mittelpunkt stehen. Um dennoch schon heute schlüssige hydraulische Versuche durchführen zu können, werden vorläufig diejenigen Tonmineralarten und -aggregatzustände verwendet, die keine oder nur geringfügige chemische Reaktionen zeigen, oder aber infolge äusserer Einwirkungen (z. B. Konsolidation) weitgehend ihre «Aktivität» eingebüßt haben.

Neben diesen mehr versuchstechnischen Problemen sind auch solche der späteren Verwendung der Versuchsergebnisse in der Flussbaupraxis genügend zu berücksichtigen. So müssen einfache Methoden gefunden werden, um die Böden klassieren und Prognosen für deren Erosionsempfindlichkeit stellen zu können. Ebenso müssen für die Wasserbaupraxis Mittel und Wege gefunden werden, um Gerinneerosionen zu verhindern oder doch in tragbarem Rahmen zu halten. Es sind dies Arbeiten, die von ebenso grosser oder noch grösserer Bedeutung sind als die eigentlichen Grundlagenuntersuchungen. Wir werden uns diesen zu gegebener Zeit mit ebenso grosser Sorgfalt annehmen, wie den Grundlagen selbst.

Adresse des Verfassers: Jürg Zeller, dipl. Ing., VAWE, 8006 Zürich, Gloriastrasse 39.