Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 77 (1985)
Heft: 1-2

Artikel: Die flussbauliche Bedeutung alternierender Bänke
Autor: Jäggi, Martin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940895

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: 10.07.2025

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

Die flussbauliche Bedeutung alternierender Bänke

Martin Jäggi

Zusammenfassung

Die wichtigsten Resultate einer Laboruntersuchung über das Auftreten alternierender Bänke werden dargestellt. Eine Beziehung zwischen Gefälle, Granulometrie des Sohlenmaterials und Gerinnebreite konnte abgeleitet werden, welche angibt, ob sich in einem gegebenen Gerinne alternierende Bänke bilden können oder nicht. Die infolge des Auftretens alternierender Bänke zu erwartenden Kolktiefen können mit Hilfe einer weiteren Gleichung abgeschätzt werden, dadurch können die Fundationstiefen der Ufersicherungen bestimmt werden. Schliesslich werden noch einige Zusammenhänge zwischen Bankbildung, Geschiebebewegung und Abflussverhältnissen diskutiert.

Résume: L'influence de la formation des bancs alternés sur des projets d'hydraulique fluviale

Les résultats essentiels obtenus lors d'une étude en laboratoire concernant la formation de bancs alternés sont présentés. Une relation entre la pente, la granulomètrie des matériaux de fond et la largeur du chenal a pu être dérivée. Elle permet d'indiquer si pour un chenal donné il faut s'attendre à la formation des bancs alternés ou non. Une autre équation permet d'estimer la profondeur d'affouillement résultant de la formation de bancs alternés, ce qui permet alors de déterminer la profondeur de fondation nécessaire pour les ouvrages de protection des berges. Finalement quelques relations entre la formation des bancs, le charriage d'alluvions et les conditions d'écoulement sont discutés.

Summary: Effect of alternate bar formation on river training

The main results of a laboratory study concerning alternate bar formation are presented. A relation between slope, bed material granulometry and channel width was established which indicates whether in a given channel alternate bars will form or not. Another equation allows assessment of scour depth resulting from alternate bar formation, the necessary foundation depth for bank protection works can then be deducted. Some relations between bar formation, bedload transport and flow conditions are also discussed.

Bei vielen grossen Flusskorrektionen des 19. Jahrhunderts wurden die Flussprofile verengt und weite Flussstrecken begradigt. Dabei erhoffte man sich nicht nur eine Vermeidung von gefährlichen Auflandungen, sondern offenbar eine stabile ebene Sohle, wodurch auf grosse Fundationstiefen bei den Dammsicherungen verzichtet werden könne [6]. Nach Ausführung der Korrektionen wurde aber in vielen

Bild 1. Alternierende Bänke im Alpenrhein. Abschnitt bei Trübbach (SG), in dem ergänzende Naturmessungen durchgeführt wurden (Foto W. Wachter, FL- 9494 Schaan).

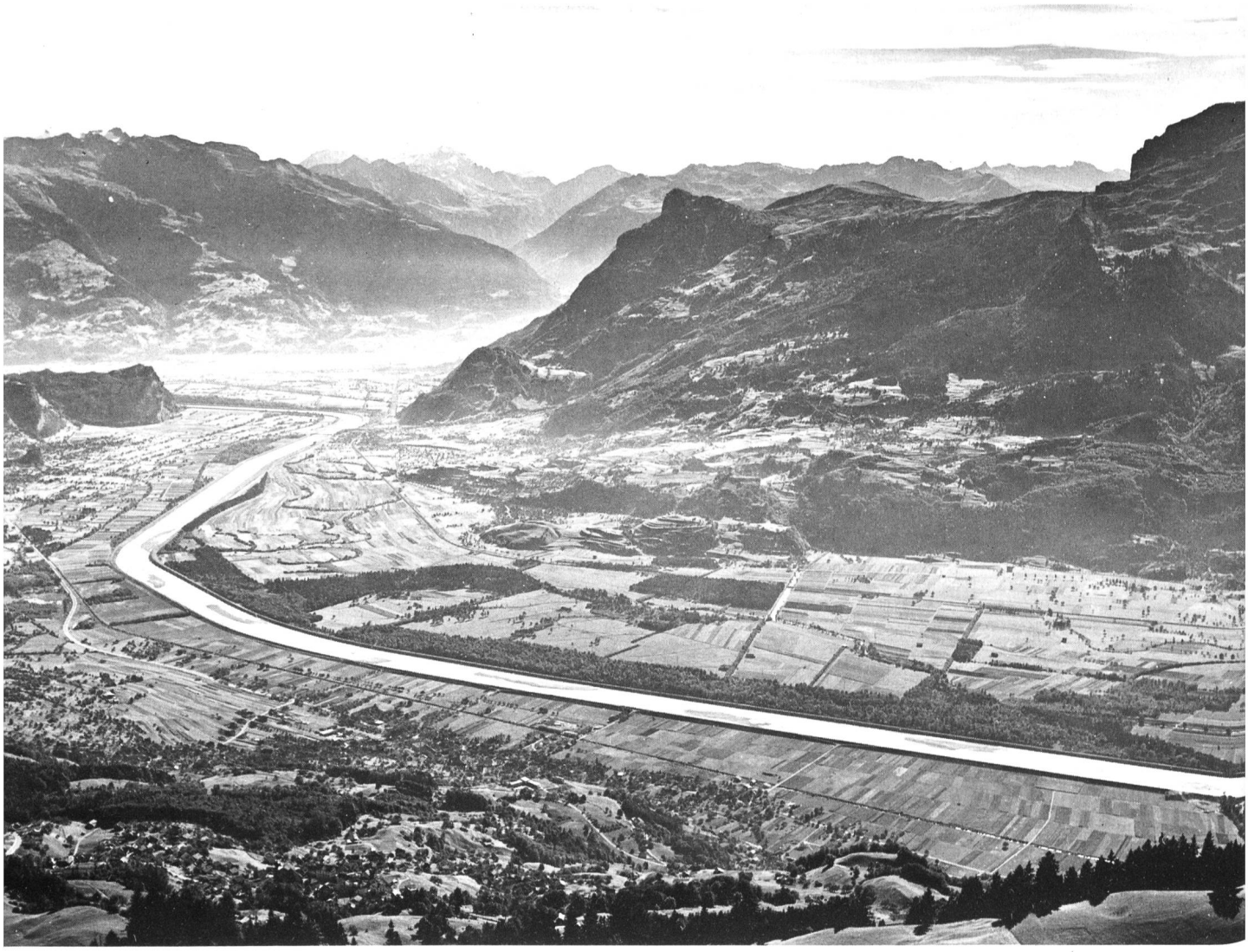


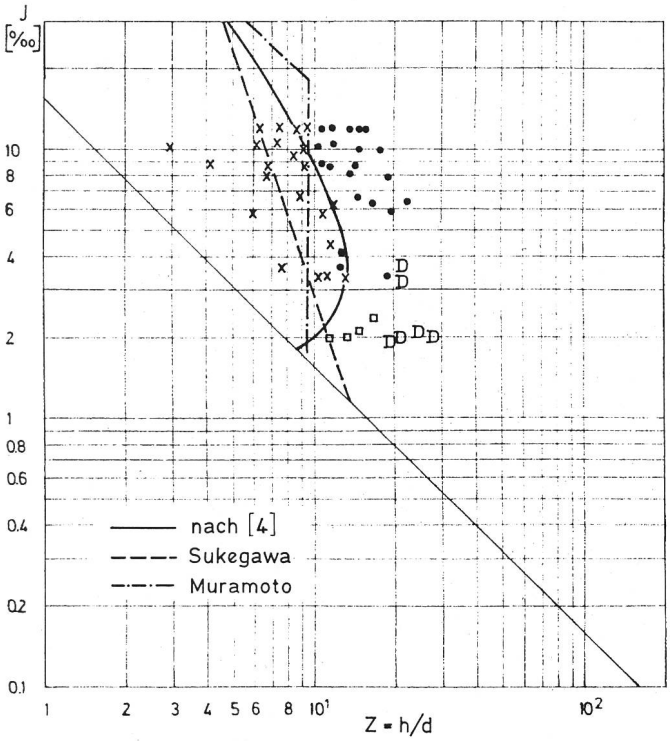
Bild 2. Beispiel eines geraden Flusslaufs ohne alternierende Bänke; Rhone bei Visp (VS).

Flüssen das Auftreten der charakteristischen alternierenden Bänke festgestellt. Diese sind von lokalen Kolken erheblichen Ausmasses begleitet, womit ein durch die Begradigung anvisiertes Ziel hinfällig wurde. Bei sehr engen Korrektionsprofilen blieb allerdings die Sohle eben.

Die Frage, ob in einem Gerinne alternierende Bänke auftreten oder nicht, betrifft somit in erster Linie die Sicherheit der Ufersicherungen. Falls Bänke erwartet werden, sollten die Kolktiefen und die Auswirkungen auf den Abfluss abgeschätzt werden können. Bankstrukturen bestimmen den Charakter eines Flusses bei Niederwasser und sind somit bei Überlegungen betreffend Umwelteinflüsse flussbaulicher Massnahmen von entscheidender Bedeutung [3].

In einer kürzlich an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich abgeschlossenen Untersuchung [4] wurde diesen Fragen nachgegangen. Die wichtigsten Resultate sind hier zusammengefasst. In dieser Untersuchung konnten Resultate von Naturmessungen der Rheinbauleitung Rorschach sowie regelmässige Luftaufnahmen der Flugwaffenbrigade 31 der Schweiz. Luftaufklärung miteinbezogen werden. Beiden Stellen sowie dem Bundesamt für Wasserwirtschaft sei an dieser Stelle für die Unterstützung bestens gedankt.

Bild 3. Versuchsresultate mit PVC-Granulat als Sohlenmaterial (x = alternierende Bänke, ● = Schrägbänke, □ = ebene Sohle, *D* = Dünen). Definition des bankbildenden Bereichs, Vergleich des Kriteriums für die obere Grenze mit ähnlichen Kriterien nach [5] und [8].



Kriterium für das Auftreten alternierender Bänke

Darstellung der Versuchsergebnisse

Bild 1 zeigt eine charakteristische Korrektionsstrecke mit alternierenden Bänken, Bild 2 eine solche mit einer stabilen ebenen Sohle. Im Rahmen der Untersuchung sollte nun vorerst die Frage beantwortet werden, ob in Funktion von Abfluss- und Materialparametern sowie der Gerinnegeometrie ein eindeutiges Kriterium gefunden werden könnte, das eine Voraussage über die Sohlenmorphologie erlauben würde.

Bild 3 zeigt die Resultate einer Versuchsgruppe mit einem bestimmten Sohlenmaterial. Für eine solche Serie blieb das Verhältnis von Sohlenbreite B zu massgebendem Korndurchmesser d_m konstant. Die experimentellen Punkte sowie verschiedene Kriterien zur Abgrenzung des bankbildenden Bereichs konnten deshalb in einem Diagramm dargestellt werden, welches das Gefälle J als Funktion der relativen Rauhigkeit $Z = h/d_m$ wiedergibt. Gemäss Bild 3 konzentrieren sich die Punkte, welche das Auftreten von alternierenden Bänken darstellen, in einen abgegrenzten bankbildenden Bereich, während die übrigen experimentellen Punkte ausserhalb dieses Bereichs fallen. Andere Versuchsserien mit anderen Sohlenmaterialien ergaben ähnliche Bilder, jedoch ist die Lage des bankbildenden Bereichs je nach Verhältnis Gerinnebreite zu Korndurchmesser und auch der Dichte des Materials verschieden.

Es war nötig, die sogenannten Schrägbänke von den alternierenden Bänken zu unterscheiden. Ihr Aussehen ist zwar den alternierenden Bänken ähnlich, ihre Geometrie ist jedoch recht verschieden, und besonders sind die resultierenden Kolktiefen erheblich kleiner. Bild 4a zeigt die Simulation alternierender Bänke im Labor, Bild 4b diese Schrägbänke.

Zwei Trennlinien bestimmen im wesentlichen den bankbildenden Bereich. Die untere Grenze ist grundsätzlich durch den Beginn der Geschiebebewegung gegeben. Ist η das Verhältnis der vorhandenen zur kritischen Schubspannung, so bestimmt $\eta = 1$ den Transportbeginn und somit die untere Grenzlinie des bankbildenden Bereichs. In Bild 3 ist diese Funktion durch eine Gerade dargestellt. Die obere Grenzlinie konnte im Rahmen dieser Untersuchung [4] aufgrund einer Dimensionsanalyse durch eine Funktion angenähert werden, welche in der Darstellungsart von Bild 3 durch eine gekrümmte Linie illustriert wird. Ausgehend vom Schnittpunkt mit der unteren Grenzlinie entfernt sie sich zunächst stark von dieser und nähert sich dann einer der unteren Grenzlinie parallelen Asymptote.

Die obere Grenzlinie wurde durch diverse Kriterien, die aus früheren Untersuchungen abgeleitet sind, bereits angenähert. Ein Vergleich mit zwei dieser Kriterien zeigt eine recht gute Übereinstimmung. Die neue Grenzlinie entspricht denn auch ungefähr einer polygonalen Verbindung des mittleren Abschnitts *Sukegawas* [8] sowie des unteren und oberen Abschnitts *Muramotos* [5].

Grundlagen zur Ableitung eines Kriteriums

Von entscheidender Bedeutung ist aber nicht die Übereinstimmung der oberen Grenzlinie mit Versuchsresultaten in einem kleinen Bereich, sondern die Frage, ob für ein Ge-

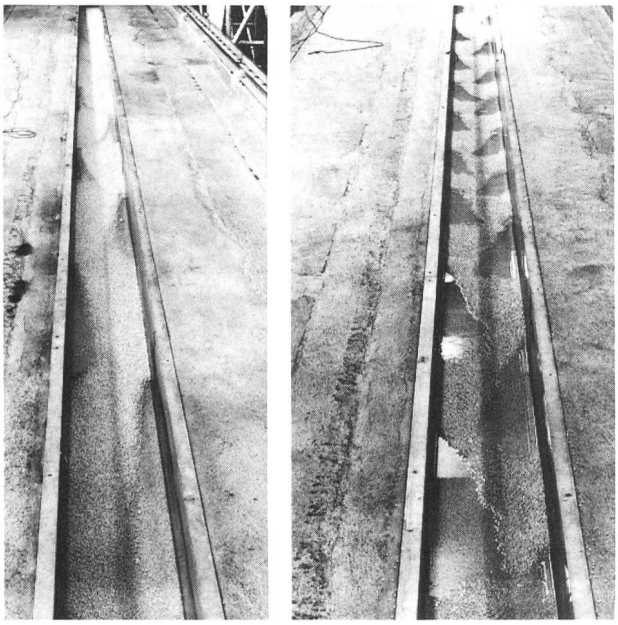


Bild 4. Unterscheidung zwischen alternierenden Bänken (a) und Schrägbänken (b) im Versuch.

rinne in einem gegebenen Abflussbereich der bankbildende Bereich überhaupt erreicht wird oder nicht. In der Darstellung von Bild 3 entspricht ein solcher Abflussbereich bei gegebener Gerinnegeometrie einem horizontalen Geradensegment. Normalerweise wird ein Teil des Abflussbereichs im Bereich mit und ein Teil im Bereich ohne Geschiebetransport liegen. Sind B und d_m gegeben, so ergibt sich ein Minimalgefälle, oberhalb dessen der bankbildende Bereich durch den Abflussbereich gekreuzt wird. Für kleinere Gefälle wird der bankbildende Bereich nicht erreicht, die Sohle bleibt eben oder es entstehen kleinere Sohlenformen, welche von verhältnismässig geringer Kolkung begleitet sind. Besondere Versuche haben ergeben, dass ein Durchfahren des bankbildenden Bereichs durch mittlere Abflüsse zur Bildung stabiler Bänke ausreicht. Kurzzeitig auftretende Abflussspitzen, welche stark Geschiebe führen, aber ausserhalb des bankbildenden Bereichs liegen, vermögen die Bänke nicht auszugleichen.

Es liesse sich also aus der Funktion für die obere Grenzlinie des bankbildenden Bereichs direkt das erwähnte Minimalgefälle ableiten, wird der Wert dieser Funktion für $\eta = 1$ gesucht. Allerdings muss, wie die Versuche zeigten, die natürliche Sohlenabpflästerung berücksichtigt werden. Natürliche Kiessohlen bestehen aus Mischungen grösserer und kleinerer Komponenten. Der theoretische Wert $\eta = 1$ ist auf den sogenannten massgebenden Korndurchmesser bezogen, der effektive Transportbeginn kann wegen der Streuung der Korngrössen bei einem anderen Wert von η auftreten. Sind in der Sohle wesentlich gröbere Komponenten vorhanden als der aus allen Komponenten ermittelte massgebende Korndurchmesser d_m, so werden bei Sohlenschubspannungen entsprechend $\eta = 1$ die feineren Komponenten erodiert, die gröberen bleiben aber liegen und bilden eine für diese Verhältnisse stabile Pflästerungsschicht. Derjenige Wert von η, für den die Pflästerungsschicht aufbricht, entspricht dann nicht nur dem effektiven Transportbeginn, sondern auch der unteren Grenzlinie des bankbildenden Bereichs.

Sohlenabpflästerung

Auch auf einer stabilen Deckschicht ist der Transport von feinerem Geschiebe möglich. Die Menge des transportierten Materials richtet sich dann ausschliesslich nach der Zufuhr vom Oberwasser. Dieses feinere Material kann durch den Transport unter Umständen auch zu alternierenden Bänken zusammengehäuft werden. In diesem Fall ist aber die Kolktiefe vernachlässigbar klein, da die Sohlenpflästerung die Erosion verhindert. Dieser Fall sei demzufolge nicht dem bankbildenden Bereich zugezählt.

Der dimensionslose Ausdruck der Grenzschleppspannung θ_D für eine stabile Pflästerungsschicht kann nach *Günter* [2] berechnet werden. Durch Umformungen erhält man

$$\theta_D = 0{,}05\,(d_{mD}/d_m)^{0{,}67} \qquad (1)$$

wobei

$$\theta_D = h\,J\,/\,(s-1)\,d_m \qquad (2).$$

Der mittlere Korndurchmesser der Pflästerungsschicht d_{mD} kann nach *Günter* oder nach *Gessler* [1] berechnet werden. Näherungsweise kann er mit etwa d_{85} bis d_{90} angenommen werden. Die relative Dichte s des Materials beträgt bei natürlichem Sand oder Kies meist etwa 2,65. Bei bekanntem d_m muss entweder das Gefälle J oder die Abflusstiefe h bekannt sein, dann kann der Grenzwert für den anderen Parameter für das Auftreten der Deckschicht bestimmt werden.

Gleichung (1) gibt nun auch die verallgemeinerte Form für die Grenzlinie des bankbildenden Bereichs. Das Minimal-

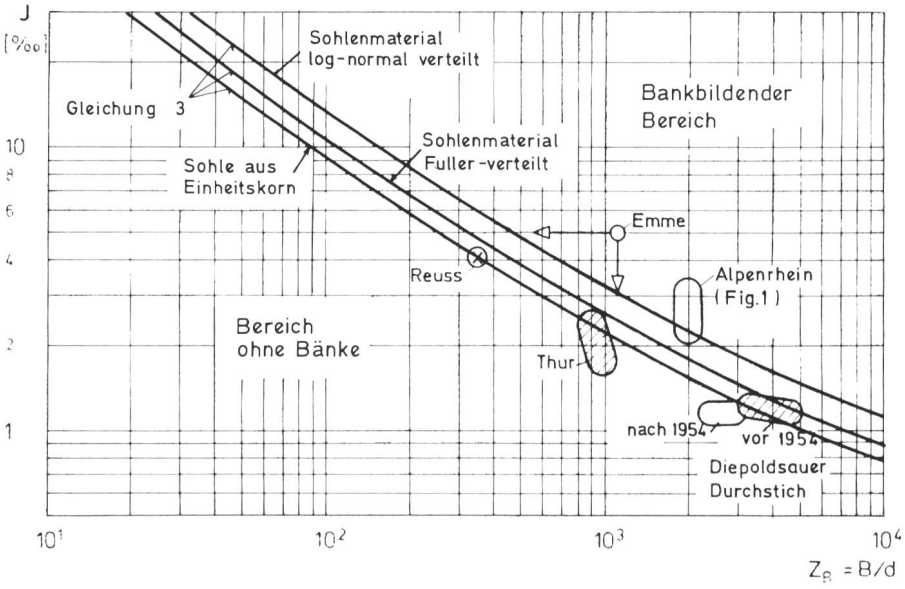


Bild 5. Dimensionierungsdiagramm für das Auftreten alternierender Bänke. Der Zusammenhang zwischen Gefälle, Gerinnebreite, Korngrösse und Kornverteilungskurve bestimmt, ob in einem Gerinne alternierende Bänke auftreten oder nicht. Überprüfung an einigen Schweizer Flüssen.

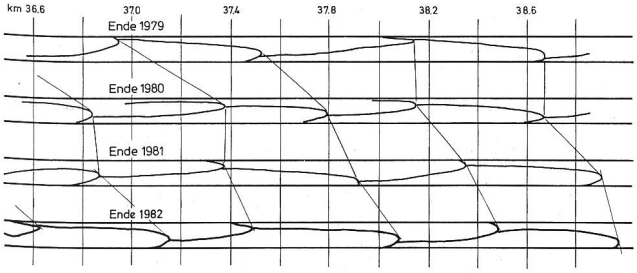


Bild 6. Position der Kiesbänke im Alpenrhein bei Trübbach im Spätherbst der Jahre 1979, 1980, 1981 und 1982.

gefälle für die Bankbildung ergibt sich nun nicht mehr für $\eta = 1$, sondern für $\eta = (d_{mD}/d_m)^{0,67}$. Bei einer Sohle aus Einheitskorn ergibt sich zwangsläufig wieder der Wert 1, während bei einer Fuller-Verteilung des Sohlenmaterials η auf etwa 1,5 und bei der normalerweise noch stärkeren Streuung der Grobanteile auf etwa 2 ansteigt.

Kriterium für die Gerinnedimensionierung

Das Minimalgefälle für die Bildung von alternierenden Bänken ergibt sich somit als Funktion der Gerinnebreite B, des massgebenden Korndurchmessers d_m und der Kornverteilung, welche durch einen Parameter M ausgedrückt ist, zu

$$J \quad \frac{\exp\left[1{,}07(B/d_m)^{0,15} + M\right]}{12{,}9\,(B/d_m)} \qquad (3)$$

Entsprechend den oben erwähnten Werten von η nimmt M mit zunehmender Kornverteilung von 0,34 auf etwa 0,7 zu.
In Bild 5 ist die Grenzbedingung (3) für verschiedene Kornverteilungen dargestellt. Darin sind auch einzelne Abschnitte einiger Schweizer Flüsse aufgetragen. Sie fallen jeweils in den richtigen Bereich und bestätigen die Beziehung (3). Es ist auffallend, dass alle diese Flussabschnitte recht nah an der Grenzlinie liegen. Es braucht oft nur eine kleine Variation des Gefälles, der Breite oder des massgebenden Korndurchmessers, damit der Charakter des Flussbetts ändert. Die Pfeile bei der Emme deuten in diesem Sinne an, dass zum Beispiel eine Gefällsreduktion die Bänke zum Verschwinden bringen würde. Effektiv finden sich in der Emme auch nur im oberen Teil alternierende Bänke.
In dieser Betrachtung werden die verzweigten Flüsse als Spezialfall innerhalb des bankbildenden Bereichs angesehen. Grundsätzlich besteht eine weitere Grenzbedingung, die angeben würde, ob über die Gerinnebreite eine (alternierende Bänke) oder mehrere (verzweigte Gerinne) anzutreffen sind. Analog zur Bedingung (3) könnte diese wieder als Minimalgefälle ausgedrückt sein, wobei dieses dann um einiges grösser sein muss als jenes der Bedingung (3).

Maximale Kolktiefe

Bei jenen Versuchen, welche alternierende Bänke ergaben, wurden jeweils auch die maximalen Kolktiefen entlang den Ufern gemessen. Daraus konnte eine einfache Gleichung abgeleitet werden, welche die Abschätzung maximalen Kolktiefen S infolge der Bildung von alternierenden Bänken erlaubt. Sie lautet für Rechteckgerinne

$$S = B/6\,(B/d_m)^{0,15} \qquad (4)$$

Diese Beziehungen wurden anhand der Messresultate der Rheinbauleitung im Alpenrhein überprüft. Da es sich um ein Trapezgerinne handelt, musste Beziehung (4) abgewandelt werden:

$$S = (B - 2nS)\ /\ 6\,[(B - 2nS)/d_m]^{0,15} \qquad (5)$$

Darin ist $1/n$ die Neigung der seitlichen Böschung. Durch die Modifikation wird berücksichtigt, dass durch den Kolkvorgang die Gerinnebreite kleiner wird, was allerdings nur durch einen massiven Unterhalt möglich ist. Die maximale Kolktiefe im Alpenrhein betrug nach Messungen 4,55 m, nach Gleichung (5) sind es 4,68 m.

Bankwanderung und Geschiebetransport

Die Migrationsgeschwindigkeit von Sohlenformen gibt einigen Aufschluss über den Geschiebetransport in einer bestimmten Flussstrecke. Bei sandführenden Flüssen mit einer von Dünen bedeckten Sohle kann es sogar genügen, die Wanderung dieser Dünen zu beobachten. Bei idealer Dreiecksform der Dünen ergibt das Produkt der halben Dünenhöhe mit der Wanderungsgeschwindkeit der Dünen die mittlere spezifische Transportrate.
Bei der Wanderung der alternierenden Bänke sind die Verhältnisse etwas komplexer. Es gibt einen ziemlich grossen Geschiebeanteil, der durch den Talweg zwischen den Bänken hindurch transportiert wird. Vor allem bei kleineren Hochwassern dürfte Feingeschiebe auf diese Art transportiert werden. Bei den grossen Abflüssen in den Laborversuchen war hingegen zu beobachten, dass der obere Teil der Bank erodiert, das Geschiebe um die Bank herumgelenkt und schliesslich unterhalb der Bank wieder abgelagert wird und somit die Bank wieder verlängert.
Bei bettbildenden Hochwassern mit starker Bankwanderung scheint deshalb der Anteil des dem Talweg folgenden Geschiebes gering zu sein. Systematisch konnte der Zusammenhang zwischen Bankwanderung und Geschiebetransport allerdings im Rahmen dieser Versuche nicht untersucht werden. Gewisse Schlüsse können aus der Auswertung der Luftaufnahmen des Alpenrheins gezogen werden.
Bild 6 zeigt die Auswertung der Luftaufnahmen bezüglich Migrationsgeschwindigkeit der Bänke für eine Beobachtungsperiode 1979–1982. Im Mittel betrug die Wanderungsgeschwindigkeit 150 m pro Jahr, allerdings mit Spitzenwerten bis 400 m pro Jahr. Diese Unterschiede sind auf unterschiedliche Grösse und Entwicklungsstadien der Bänke zurückzuführen. So wanderten in der beobachteten Strecke die oberen Bänke zu Beginn der Beobachtung relativ rasch, während die unteren grossen Bänke am Ort verharrten. Diese gleichen Bänke wurden dann im Jahr darauf weiterbewegt, während die oberen, jetzt grösser geworden, an Ort stehen blieben. Die Wanderungsgeschwindigkeit scheint also zyklischen Schwankungen zu unterliegen, die sich über Jahre erstrecken können.
Bild 7 zeigt die Änderung eines Sohlenprofils infolge Bankwanderung. Der durch diese Änderungen betroffene Anteil an Querschnitttsfläche entspricht im Prinzip der Dünenhöhe, für die beobachtete Strecke des Alpenrheins beträgt diese Fläche ungefähr 400 m². Multipliziert man die Hälfte

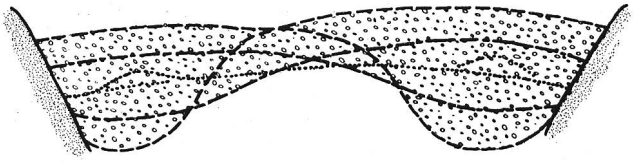


Bild 7. Variation eines idealisierten Querprofils infolge Bankwanderung, Bestimmung des Geschiebeanteils einer Bank.

dieses Werts mit den oben erwähnten Migrationsgeschwindigkeiten, so resultieren jährlich umgelagerte Geschiebefrachten von im Mittel 30000 m³, während örtlich Umlagerungen von bis zu 80000 m³ erfolgten.
Diese Zahlen liegen wesentlich tiefer, als sie üblicherweise für die Geschiebefracht dieses Abschnitts des Alpenrheins angegeben werden. Es ist allerdings zu beachten, dass – wie erwähnt – nur der Teil des Geschiebes erfasst ist, das infolge Sohlenumlagerungsprozessen bewegt wird. Beim Transport entlang des Talwegs werden aber zum grossen Teil nur feinere Komponenten bewegt, dessen Ausmass hautpsächlich durch die Zufuhr von Oberwasser bestimmt wird und für die Sohlenstabilität kaum eine Rolle spielt. Werden aber die Bänke fortbewegt, so kommt jener Geschiebeanteil in Bewegung, der flussbaulich am relevantesten ist. Erst in diesem Fall führen Diskrepanzen zwischen Geschiebetransportkapazität und Geschiebezufuhr zu eindeutigen Sohlenerosionen oder Auflandungen.
Es scheint somit nötig zu sein, zwischen Gesamtgeschiebefrachten und dem flussbaulich relevanten Anteil zu unterscheiden. Durch die Bewegung alternierender Bänke könnte dieser zweite Anteil grösstenteils bestimmt werden. Allerdings müssten die Zusammenhänge noch besser geklärt werden, damit eindeutige Resultate erhalten werden. Ansätze scheinen sich aus dem obigen Zahlenvergleich jedoch zu ergeben.

Abflussverhältnisse

Die Laboruntersuchungen ergaben, dass bei bankbildenden Hochwassern keine spürbaren Formverluste zu befürchten sind. Dies bedeutet, dass die Gerinneabflusskapazität durch das Auftreten alternierender Bänke nicht verändert wird.
Auch die Analyse von Wasserspiegelmessungen im Alpenrhein zeigte, dass die Bänke Abflüsse über 300 m³/s kaum mehr spürbar beeinflussen. Der Abfluss kann also über diesem Grenzwert mit einer klassischen Fliessformel, welche die Kornreibung an der Sohle und die Wandreibung berücksichtigt, bestimmt werden.
Anliegen des Natur- und Landschaftsschutzes sowie der Fischerei machen es notwendig, dass nicht nur die Abflussverhältnisse bei Hochwasser abgeschätzt werden, sondern auch bei den während des grössten Teils eines Jahres vorhandenen Niederwassern. Dazu fehlen jedoch noch häufig die Berechnungsgrundlagen.
Bei Abflüssen von der Grössenordnung des Jahresmittels (150 m³/s) und darunter entsteht im Alpenrhein praktisch eine Serie von Kaskaden. Der Abfluss fällt jeweils an den Wendepunkten über den Bankrücken und bildet dort kurze Schnellen (Läufe), während in den dazwischen liegenden Kolkbecken die Fliessgeschwindigkeit klein und die Abflusstiefe gross ist. Hydraulisch gesehen kontrolliert der Überfall am Wendepunkt den Wasserstand im oberliegenden Kolkbecken.
Bild 8 zeigt solche Überfälle im Detail. Aus der Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Aufnahmen ergab sich, dass die Überfallängen je nach Entwicklungsstadium der Bänke 180 bis 320 m betrugen. Durch Anwendung der bekannten Überfallformeln ergeben sich für den Bereich der Mittel- und Niederwasser im kritischen Abflussquerschnitt Abflusstiefen von 0,2 bis 0,5 m und Fliessgeschwindigkeiten von 1,2 bis 1,8 m/s. Da sich in den Überfallrücken Rinnen bilden, treten lokale Unterschiede auf. Eine Detailvermessung ist bei der Abschätzung der Abflussverhältnisse in den Läufen unumgänglich. Fest steht, dass auch bei Niederwasser in den Kolkbecken Abflusstiefen von mehreren Metern vorhanden sein müssen.

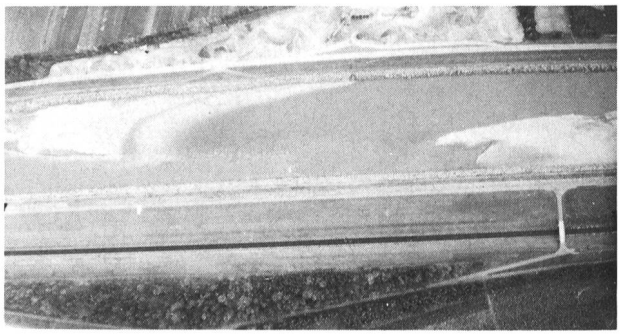


Bild 8. Details von Luftaufnahmen des Alpenrheins, Schnelle (Lauf) am Übergang zwischen zwei Bänken. (Aufnahme: Militär-Flugdienst, Dübendorf)

Wie bedeutend die Strukturen der Flusssohle und die resultierenden Geschwindigkeitsunterschiede für das Leben im Fluss sind, wurde anderswo ausgeführt [7]. Mit diesen kurzen Zahlenangaben sei ein möglicher Weg aufgezeigt, wie das Problem der Niederwasserabflussverhältnisse und somit beispielsweise der Restwassermengen in Zukunft angegangen werden könnte.

Schlussfolgerungen

Laborversuche über die Bildung von alternierenden Bänken sowie Naturbeobachtungen im Alpenrhein erlaubten es, verschiedene Dimensionierungsregeln aufzustellen. Mit Ansatz (2) kann abgeschätzt werden, ob sich in einem bestimmten Gerinne alternierende Bänke bilden oder nicht. Gleichung (3), respektive (4) erlauben es, die Grössenordnung der Kolktiefen zu bestimmen, die beim Auftreten von alternierenden Bänken entlang der Ufer erwartet werden müssen.
Der Zusammenhang zwischen Bankbewegung und Geschiebefracht muss weiter untersucht werden. Die bisherigen Untersuchungen erlauben es, einige grundsätzliche Schlüsse zu ziehen. Weiter ist der grundsätzliche Weg aufgezeigt worden, wie bei der Behandlung von Problemen im Zusammenhang mit Niederwasserabflussverhältnissen vorgegangen werden könnte.

Literatur

[1] Gessler, J., «Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen, untersucht an natürlichen Abpflästerungserscheinungen in Kanälen»; Mitt. der Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau, ETH Zürich, Nr. 69, 1965.

[2] *Günter, A.*, «Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen»; Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, ETH Zürich, Nr. 3, 1971.

[3] *Jäggi, M.*, «Natürliche und korrigierte alpine Flüsse»; «wasser, energie, luft», 72. Jahrgang. Heft 3, März 1980, pp. 85–90.

[4] *Jäggi, M.*, «Alternierende Kiesbänke»; Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, ETH Zürich, Nr. 62, 1983.

[5] *Muramoto, Y.*, and *Fujita, Y.*, «The Classification of Meso-Scale River Bed Configuration and the Criteria of its Formation»; 2nd Meeting of Hydr. Res. in Japan, 1978, pp. 275–280.

[6] *von Salis, A.*, «Das Schweizerische Wasserbauwesen»; Stämpflische Buchdruckerei, Bern, 1883.

[7] *Stuart, T. D.*, «Spawning, Migration and Reproduction of Loch Trout»; Freshwater and Salmon Fisheries Res. Station, Scotish Home Dept., Edingburgh, Her Majesty Stationary Office, 1953.

[8] *Sukegawa, N.*, «Criterion for Alternate Bar Formation»; Memoirs of the School of Science and Engrg., Waseda Univ., Tokyo, Nr. 36, 1972.

Adresse des Verfassers: Dr. *Martin Jäggi*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETHZ, Gloriastrasse 37/39, 8092 Zürich.