

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 85 (1993)
Heft: 10

Artikel: Berechnungsgrundlage der inneren Kolmation von
Fließgewässersohlen
Autor: Schälchli, Ueli
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940014>

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: 10.02.2026

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

Berechnungsgrundlagen der inneren Kolmation von Fliessgewässersohlen

Ueli Schälchli

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich in einem ersten Teil mit den sichtbaren Anzeichen und dem Ablauf der inneren Kolmation. Anschliessend werden schwerpunktmässig die neu entwickelten Berechnungsgrundlagen vorgestellt, die es erstmals erlauben, die Kolmationsentwicklung und die Rahmenbedingungen der Dekolmation mathematisch zu beschreiben. Der Einfluss der massgebenden Variablen wird einzeln untersucht und interpretiert. Grundlage für die Herleitung der diversen Gleichungen bilden ausgedehnte Rinnenversuche, die an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich durchgeführt worden sind.

1. Einleitung

Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf alluviale Fliessgewässersohlen, die in der Regel aus einer Mischung verschieden grosser und gerundeter Körner bestehen, die ein poröses und durchlässiges Filtermedium aufbauen. Dabei infiltriert Wasser bei tiefem Grundwasserspiegel durch die Gewässersohle in den Boden oder exfiltriert, bei hohem Grundwasserspiegel, aus der Sohle. Das im Gerinne abfliessende Wasser weist immer einen kleineren oder grösseren Anteil von festen anorganischen und organischen Bestandteilen auf, die in suspensierter Form flussabwärts transportiert werden. Infiltriert dieses Wasser durch die Gewässersohle in den Boden, so werden diese Feinpartikel auf der Gewässersohle abgelagert oder im Porenraum der obersten Schicht ausfiltriert und an das Filtermedium angelagert. Dadurch nimmt die Durchlässigkeit ab und die Gewässersohle verfestigt sich. Dieser Prozess wird als *Kolmation* bezeichnet. Bei einer Ablagerung der Feinpartikel auf der Sohle spricht man von *äusserer*, bei Ablagerung im Porenraum der Sohle von *innerer* Kolmation.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die physikalischen Prozesse der *inneren* Kolmation, welche in nur schwach eutrophierten, regelmässig geschiebeführenden Gewässern die massgebende Rolle spielt. Die äussere Kolmation macht sich vor allem in Flussstauhaltungen bemerkbar (vgl. z.B. Ingerle, 1991, Schälchli, 1992). Unter bestimmten Voraussetzungen kann zudem die biologische oder die chemische Kolmation einen grösseren Einfluss erlangen. Eine Zusammenstellung der diesbezüglich gefundenen Literatur ist in Schälchli (1993) zu finden.

Der Transport und die Ablagerung von Feinpartikeln in der Gewässersohle ist ein natürlicher Prozess. Generell kann beobachtet werden, dass bei kleinen und mittleren Abflüssen die Durchlässigkeit der Gewässersohle abnimmt und einem unteren Grenzwert zustrebt. Hochwasserabflüsse, die eine Lockerung der Sohle oder ein Aufreissen der Deckschicht auslösen, führen dagegen zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit und damit zur *Dekolmation* der Sohle. Aufgrund dieser Zusammenhänge kann bei Fliessgewässersohlen von einer eigentlichen *Ganglinie der Kolmation* gesprochen werden, welche durch verschiedene anthropogene Eingriffe beeinflusst werden kann. Eine Begünstigung der Kolmation ist zu rechnen bei

- einer Ableitung der Hochwasserspitzen in einem Entlastungsgerinne oder der Dämpfung derselben durch ein grösseres Staubecken,
- Gewässerkorrekturen wie Begradigungen, Schwellenbau und Uferschutz,
- einer Erhöhung des Schwebstoffeintrags durch Aktivitäten im Einzugsgebiet, welche die Bodenerosion fördern und damit die Schwebstoffkonzentration im Abfluss erhöhen
- oder bei Flussstauhaltungen.

Die Auswirkungen solcher Eingriffe können schwanken zwischen einer kaum nachweisbaren Veränderung bis zu einer ausgeprägten und nachhaltigen Abdichtung der Gewässersohle. Inwiefern und in welchem Ausmass die Kolmations-Ganglinie beeinflusst wird, muss daher immer im konkreten Einzelfall abgeklärt werden.

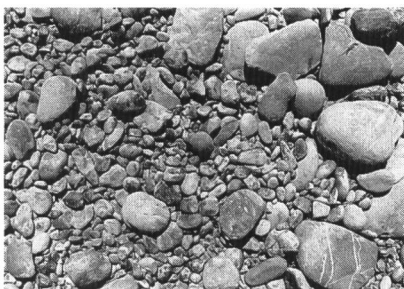


Bild 1a, links. Oberfläche einer unkolmatierten Sohle.



Bild 1b, rechts. Unkolmatiertes Korngefüge nach dem Entfernen eines Deckschichtkorns.



Bild 2a. Oberfläche einer innerlich kolmatierten Sohle.

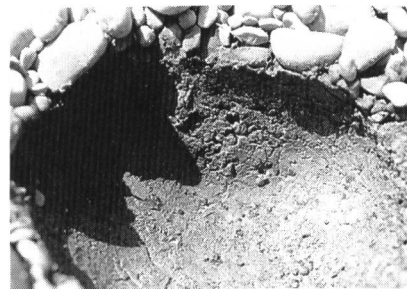


Bild 2b. Kolmatiertes Korngefüge nach dem Entfernen eines Deckschichtkorns.



Bild 2c. An der Unterseite eines Deckschichtkorns haftende Kolmationsmasse.

2. Kolmationsprozesse

2.1 Anzeichen der inneren Kolmation

In trockenengefallenen Ufer- oder Sohlenpartien können Anzeichen der inneren Kolmation gefunden werden. Die Bilder 1 und 2 zeigen Fotos der Sohle einer Kiesbank der Töss bei Kollbrunn (Kanton Zürich). Auf Bild 1a ist die Oberfläche einer sauberen, ausschliesslich aus Kies und größerem Material aufgebauten Sohle zu sehen. Wird ein grösserer Stein aus dem Deckschichtverbund entfernt, so setzt sich dieses lockere Korngefüge mit zum Teil größeren Poren in die Tiefe fort (Bild 1b). Dieser Sohlenbereich kann als nicht kolmatiert bezeichnet werden. Demgegenüber sind auf Bild 2a die Zwischenräume der einzelnen Steine der Sohlenoberfläche durch Feinmaterial aufgefüllt und verkittet worden. Dieses Feinmaterial wurde bei nur schwacher Strömung in den geschützten Bereichen der Sohlenoberfläche abgelagert. Wird hier ebenfalls ein Stein entfernt, so erkennt man darunter einen Kolmationshorizont, der sich aus nachträglich verfrachtetem kohäsivem Feinmaterial gebildet hat (Bild 2b). Auffallend ist ausserdem, dass an der Oberfläche des entfernten Steins ein Teil der Kolmationsmasse – inklusive einiger kleinerer Körner des Sohlengefüges – haften bleibt (Bild 2c).

Entsprechend diesen Beobachtungen zeigen kolmatierte Sohlen

- einen höheren Feinmaterialanteil, vor allem unmittelbar unterhalb der Deckschicht (vgl. auch VAW-Bericht 970/II: Resultate der schichtweisen Analyse des Sohlenmaterials),
- keine Grobporen,
- nach einem Absinken des Wasserspiegels einen längerandauernden hohen Feuchtigkeitsgehalt
- und unter der Deckschicht eine kohäsive Kittmasse, die die einzelnen Komponenten des Sohlenmaterials zusammenhält.
- Zudem kann die Sohlenoberfläche zwischen den einzelnen Steinen Feinmaterialablagerungen aufweisen.

2.2 Ablauf der inneren Kolmation

Eine Fliessgewässersohle kann von oben nach unten vereinfacht in drei bis vier Schichten gegliedert werden. Die *Deckschicht* ist der der Strömung ausgesetzte, einen Korndurchmesser mächtige Verbund von oft dachziegelartig gelagerten Körnern. Unter der Deckschicht kann sich eine *Skelettschicht* befinden, die ausschliesslich aus mittleren bis grossen Körnern aufgebaut ist und eine dementsprechend hohe Durchlässigkeit aufweist. Häufig fehlt diese Skelettschicht, sie spielt jedoch wegen ihres grossen Porenraums für die Wasserfauna eine bedeutende Rolle. Unter der Skelettschicht oder direkt unter der Deckschicht liegt die *Filterschicht*. In ihr werden die im infiltrierenden Wasser enthaltenen Feinpartikel ausgeschieden und an das Korngerüst angelagert. Die Filterschicht stellt damit das eigentliche Medium für die Kolmationsprozesse dar. Als Ausgangs- oder Sohlenmaterial folgt in der Tiefe die *Unterschicht*, die von den Kolmationsprozessen nicht (oder nur unwesentlich) betroffen ist. Sie repräsentiert die charakteristische Kornverteilung des Sohlenmaterials.

Aufbauend auf dieser Gliederung der Gewässersohle kann die Kolmation von Fliessgewässersohlen in drei Phasen eingeteilt werden (Bilder 3a bis 3c):

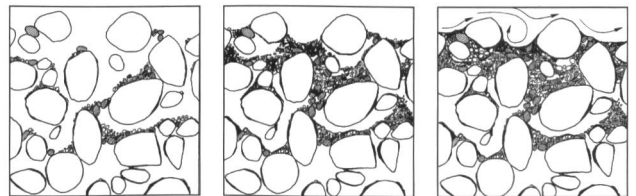
In der *ersten Phase* (Bild 3a) verstopfen im oberen Bereich der Filterschicht grosse Partikel direkt oder durch Brückenbildung die größeren Poren. Mitteltgrosse Partikel

werden innerhalb der gesamten Filterschicht abgelagert, wobei sie in größeren Poren sedimentieren und in feineren durch Einkeilung oder Interception (Auffangen eines Partikels in einer Porenverengung infolge Verjüngung der Stromröhren; vgl. Herzig, Leclerc & Le Goff, 1970) ausgeschieden werden. Die feinsten Partikel werden durch zwischenmolekulare Kräfte an die Kornoberfläche angelagert. Zu Beginn des Kolmationsprozesses können kaum alle feinen Partikel in der Filterschicht abgelagert werden. Ein Teil erreicht in dieser zeitlich kurzen Phase die Unterschicht, wodurch deren Durchlässigkeit jedoch kaum signifikant beeinflusst werden dürfte.

In der *zweiten Phase* (Bild 3b) sind die grossen Schwebstoffpartikel nur noch beschränkt an der Auffüllung grösserer Porenkanäle und von Toträumen beteiligt. Ansonsten ist ihre Ablagerung auf geschützte Stellen in den Zwischenräumen der Deckschicht beschränkt. Als dominanter Prozess erfolgt die Ablagerung der mittleren Partikel durch Einkeilung, Siebung, Brückenbildung, Interception und Sedimentation, wodurch die vielen mittelgrossen Porenkanäle von unten nach oben aufgefüllt werden. Die Durchlässigkeit der Filterschicht nimmt während dieser längeren Phase durch Verringerung der Porendurchmesser und Verlängerung der Porenkanäle markant ab. Die feinsten Partikel werden infolge der vergrösserten Oberfläche und der verringerten Filtergeschwindigkeit ausschliesslich in der Filterschicht zurückgehalten und ausgeschieden.

In der *dritten Phase* kommen fast nurmehr feinste Schwebstoffpartikel zur Ablagerung (Bild 3c). Dabei bleiben die Partikel im feinen Porensystem im Grenzbereich von Filter- und Deckschicht (oder Filterschicht – Skelettschicht) hängen, wodurch sich dort ein zunehmend dichter Kolmationshorizont mit tiefer Durchlässigkeit bildet. Dieser Prozess strebt einem Grenzwert zu, wo entweder keine weiteren Partikel ausgeschieden werden können oder die zur Ablagerung kommenden und die erodierenden Partikel sich die Waage halten. Mitteltgrosse Partikel kommen in dieser Phase höchstens noch oberflächlich zwischen sedimentierten grösseren Partikeln zur Ablagerung.

Die maximale Eindringtiefe der Feinpartikel ist abhängig von der Korngrössenverteilung des Sohlenmaterials. Aufgrund eigener Laborversuche sowie der Beobachtungen anderer Autoren (Beschta & Jackson, 1979, Diplas, 1986, Cunningham et al., 1987, Lisle, 1989) ist für die Kolmationstiefe h_k , welche sich auf die Deck- und die Filterschicht bezieht, folgende einfache Formel hergeleitet worden:



Die Seitenlänge der gezeichneten Korngerüstausschnitte entspricht 4 mm.

Bild 3a, links. Korngerüst und abgelagerte Schwebstoffpartikel nach Phase 1 (grosse Partikel sind schraffiert, mittlere Partikel durch leere Kreise und kleine Partikel durch fette Linien gekennzeichnet).

Bild 3b, Mitte. Korngerüst und abgelagerte Schwebstoffpartikel nach Phase 2.

Bild 3c, rechts. Korngerüst und abgelagerte Schwebstoffpartikel nach Phase 3.

$$h_k = 3 d_m + 0,01 \quad (1)$$

Bei sehr feinem Sohlenmaterial mit $d_m = 5$ mm erreicht h_k etwa das Fünffache des mittleren Korndurchmessers und mit zunehmendem d_m strebt die Kolmationstiefe gegen $3d_m$.

3. Berechnungsgrundlagen

3.1 Problemkreise

Die Kolmation von Fließgewässersohlen hängt von verschiedenen Einflussgrößen ab. Die im folgenden zusammengefassten Berechnungsgrundlagen sind anhand von Rinnenversuchen an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich hergeleitet worden. Bei den Versuchen ist auf eine möglichst naturgetreue Nachbildung der Kolmationsprozesse geachtet worden. Aus diesem Grund sind sowohl für das Sohlenmaterial als auch für die Schwebstoffe mehrheitlich natürliche Mischungen verwendet worden. Bild 4 zeigt einen Vergleich der in der Versuchsrinne untersuchten Sohlenmischungen mit dem Streubereich von in Schweizer Fließgewässern vorwiegend vorzufindenden Kornverteilungen.

In Bild 5 sind sechs verschiedene Problemkreise, die sich bei der Berechnung der Kolmationsganglinie ergeben, dargestellt:

- 1) Berechnung der für das anstehende Sohlenmaterial charakteristischen maximalen Durchlässigkeit k_0 .
- 2) Durchlässigkeitsabnahme infolge Eintrag und Ablagerung von Feinpartikeln in Funktion der massgebenden Einflussgrößen (Kolmationsgleichungen).
- 3) Bestimmung des Grenzwerts der Kolmation in Funktion der massgebenden Einflussgrößen.
- 4) Dimensionslose Sohlenschubspannung Θ , bei der die maximale Durchlässigkeit k_0 wieder erreicht wird ($\Theta = \tau / [\gamma_s' d_m] = h_w J / [(s-1) d_m]$).
- 5) Dimensionslose Sohlenschubspannung, bei der die Dekolmation der Sohle einsetzt.
- 6) Durchlässigkeitszunahme beim Dekolmationsbeginn.

Im folgenden werden die massgebenden Gleichungen zu diesen Problemkreisen zusammengefasst und die Bedeutung der verschiedenen Einflussgrößen interpretiert. Dabei wird auf die Darstellung der Versuchsergebnisse und die Herleitung der Formeln verzichtet, welche in Schälchli (1993) ausführlich beschrieben sind.

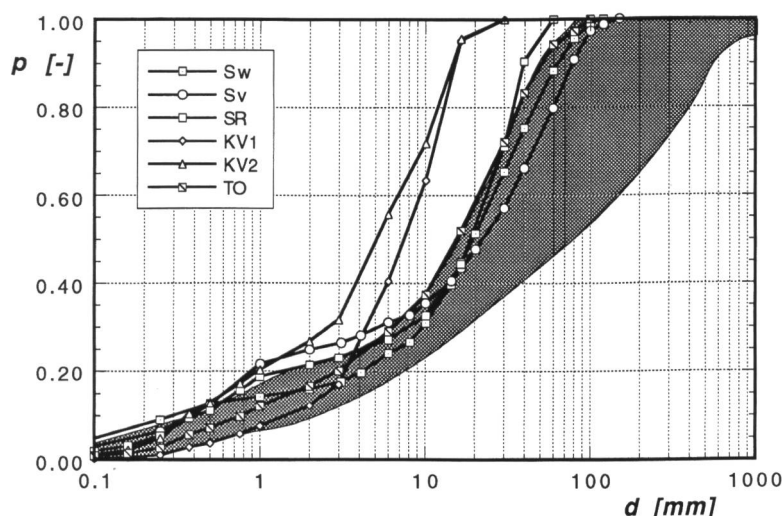


Bild 4. Kornverteilungskurven der im Versuchsstand eingebauten Mischungen sowie Streubereich natürlicher Mischungen des Sohlenmaterials.

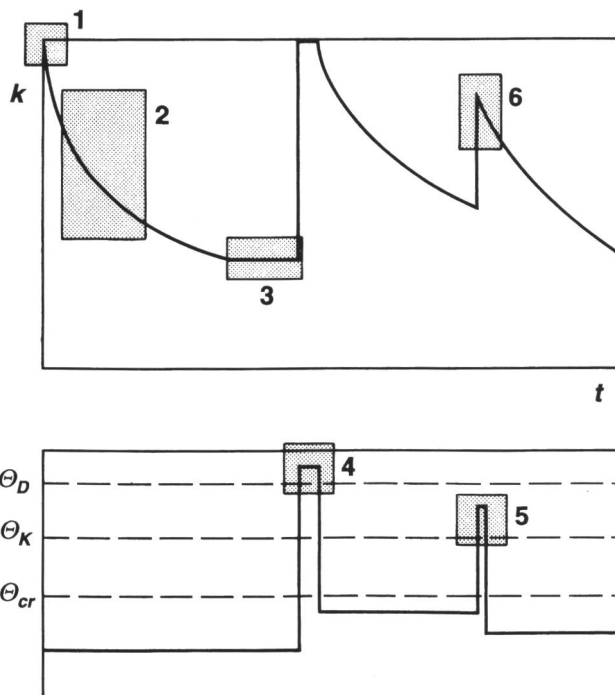


Bild 5. Problemkreise bei der Berechnung einer Kolmations-Ganglinie.

3.2 Problemkreis 1:

Maximale Durchlässigkeit des Sohlenmaterials k_0

Jedes Sohlenmaterial weist eine in Funktion ihrer Kornverteilung charakteristische Durchlässigkeit auf. Der Einfluss, der sich durch eine unterschiedliche gegenseitige Lagerung der einzelnen Körner ergeben kann, dürfte sich nur geringfügig auswirken, solange das Material durch fluviale Prozesse abgelagert worden ist. Die charakteristische Durchlässigkeit k_0 ist demnach eine Materialkonstante, die für den unkolmatierten Zustand massgebend ist und damit die maximale Durchlässigkeit der Filterschicht repräsentiert. k_0 kann nach dem Verfahren von Kozeny (1953) über die folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$\frac{1}{d_w} = \int_0^1 \frac{1}{d_{mi}} \Delta p_i \quad (2)$$

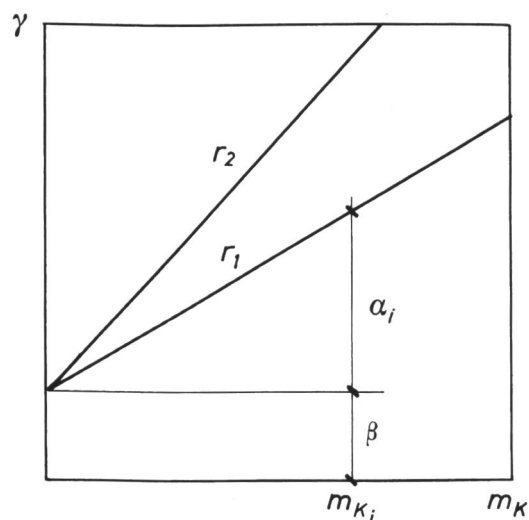


Bild 6. Widerstands-Filterbelegungsdiagramm $\gamma = r m_K + \beta$.

$$k = \frac{1}{r} 0,0405 \frac{\epsilon^3}{1 + \epsilon} d_w^2 \quad (3)$$

Mit Gleichung 2 wird über alle Fraktionen der Kornverteilung ein wirksamer Korndurchmesser des Sohlenmaterials d_w berechnet. Gleichung 3 ermöglicht anschliessend unter Berücksichtigung der Porenziffer ϵ und des Rauigkeitsbeiwerts r , der zu etwa 1,5 gesetzt werden kann, die Bestimmung von $k = k_0$. Dabei ist d_w in [mm] einzusetzen, womit k in [m/s] resultiert. Die Porenziffer $\epsilon = n / (1-n)$ ist eine Funktion der Porosität n , für welche anhand der Messungen von Jussel (1992) folgende Näherungsgleichung hergeleitet worden ist:

$$n = 48,6 C_U^{-0,20} \quad (4)$$

$C_U = d_{60}/d_{10}$ ist die sogenannte Ungleichförmigkeitszahl. Beim Verfahren von Kozeny besteht die Gefahr, dass der Einfluss der feinen Fraktionen überbewertet wird. Jussel (1992) empfiehlt daher, dass die Fraktionen mit $d < 0,06$ mm durch eine Gerade ersetzt werden, die bei $d_i = 0,06$ mm beginnt und bei $d = 0,03$ mm null Gewichtsprozent erreicht. Diese Korrektur ist jedoch nur für Proben mit einem Siltanteil von weniger als 5 % anwendbar.

3.3 Problemkreis 2: Kolmationsentwicklung

Der zweite Problemkreis betrifft die zeitliche Entwicklung der Kolmation in Abhängigkeit der massgebenden physikalischen Einflussgrössen. Das Ausmass der Kolmation wird über den Filterwiderstand erfasst, der sich aufgrund der eingelagerten Schwebstoffe aufgebaut hat.

Die Schwebstoffkonzentration kann als massgebende Einflussgrösse der Kolmation bezeichnet werden. Sie bestimmt, wieviele Feinpartikel für die Verstopfung der Filterschicht zur Verfügung stehen. Die übrigen massgebenden Einflussgrössen beeinflussen hingegen die Transportmechanismen und die Ablagerungsprozesse der Partikel im Porensystem, sie entscheiden damit massgebend über den Ort und die Mächtigkeit der entstehenden Kolmationschicht.

Entsprechend den Versuchsergebnissen ist der Einfluss folgender Variablen als signifikant zu bezeichnen:

- Die Schwebstoffkonzentration C .
- Die Kornverteilung des Sohlenmaterials, ausgedrückt durch d_{10}/d_m .
- Die Wassertemperatur und damit die Reynoldszahl eines im ruhenden Wasser sinkenden und turbulent umströmten Korns $Re = (g [s^{-1}] d_m^{1/2} d_m) / \nu$.
- Der hydraulische Gradient der Sickerströmung i .
- Die dimensionslose Sohlenschubspannung des Abflusses Θ .

Als Grundlage für die Berechnung der Kolmationsentwicklung dient die klassische Gleichung der Kuchenfiltration

$$\frac{dV_A}{dt} = \frac{A_F \Delta p_G}{\eta \left(\frac{r C V_A}{A_F} + \beta \right)} \quad (5)$$

welche integriert und umgeformt lautet

$$V_A = A_F \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 + 2 r C \Delta p_G \frac{1}{\eta} t}}{r C} \quad (6)$$

Darin bedeuten V_A = Sickerwasservolumen (= integrierter Sickerwasserabfluss), A_F = Sickerwasserfläche, β = Filterwiderstand des unkolmatierten Sohlenmaterials, r = spezifischer Filterwiderstand, C = Schwebstoffkonzentration,

$\Delta p_G = \gamma_w \Delta h_w$ = Gesamtdruckdifferenz zwischen dem Gerinnewasserspiegel und einem massgebenden Ort im Strömungsfeld der gesättigten Sickerströmung, η = dynamische Zähigkeit des Wassers, t = Zeit.

Der Filterwiderstand des unkolmatierten Filtermediums β ist umgekehrt proportional der maximalen Durchlässigkeit k_0 und zudem abhängig von der Mächtigkeit L des betrachteten Sickerwegs, über dem die Druckdifferenz Δp_G aufgebaut wird:

$$\beta = \frac{L g}{k_0 \nu} \quad (7)$$

Gemäss der klassischen Filtergleichung (5) ist der Sickerwasserabfluss dV_A/dt proportional dem Quotienten zwischen der Druckdifferenz Δp_G und der Summe aus β und dem Ausdruck $\alpha = r C V_A / A_F$, wobei $C V_A / A_F$ die bis zu diesem Zeitpunkt pro Flächeneinheit abgelagerte Schwebstoffmasse m_k darstellt. α ist demnach entsprechend der Definition von β der zusätzliche, durch die Kolmation verursachte Filterwiderstand der abgelagerten Feinpartikel. Wird die Beziehung $\gamma = \alpha + \beta = r m_k + \beta$ in einem Diagramm dargestellt (Bild 6), so entspricht der spezifische Filterwiderstand r der Steigung der damit beschriebenen Geraden. Je steiler diese Gerade wird, desto rascher nimmt der Filterwiderstand zu und desto kleiner wird die Durchlässigkeit für eine bestimmte, in der Filterschicht abgelagerte Kolmationsmasse (Filterbelegung). Der spezifische Filterwiderstand r beschreibt damit die Wirkung der abgelagerten Kolmationsmasse auf den Verlauf des Filterwiderstandes, er ist eine Funktion der massgebenden Einflussgrössen d_{10}/d_m , Re , i und Θ .

Insgesamt sind 41 Kolmationsversuche durchgeführt worden, die zusammengefasst 181 Tage dauerten. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte mit einem kommerziellen Statistikprogramm. Dabei ist durch multiple Regression die massgebende Funktion von $r = f(d_{10}/d_m, Re, i, \Theta)$ gesucht worden. Grundlegende physikalische Überlegungen sowie vergleichende statistische Auswertungen zeigten, dass die Abhängigkeit zwischen r und den massgebenden Variablen am besten durch die Potenzfunktion

$$r = \frac{5,0 \cdot 10^{12} \Theta^{0,5}}{(d_{10}/d_m)^3 Re^{1,5} i} \quad (8)$$

ausgedrückt wird. Der Einfluss der verschiedenen Variablen von Gleichung 8 kann wie folgt interpretiert werden:

Für schmale Kornverteilungen ($d_{10}/d_m \rightarrow 1$) nimmt r einen kleineren Wert an. Das heisst, dass viel mehr Feinpartikel im Filtermedium abgelagert werden müssen, um denselben Widerstand α zu erreichen. Der Grund für diesen Effekt liegt darin, dass bei uniformem Material sowohl die Poren als auch die Porosität grösser sind und damit einerseits die Partikel in grössere Tiefen transportiert werden und andererseits grössere Toträume aufzufüllen sind.

Einen ähnlichen, wenn auch geringeren Einfluss zeigt sich durch die Reynoldszahl. Bei grösserem Re – und damit höherer Wassertemperatur – stellt sich wegen der geringeren Zähigkeit eine höhere Filtergeschwindigkeit ein. Dadurch werden die Feinpartikel in grössere Tiefen verfrachtet, wodurch eine langsamere Kolmationsentwicklung und damit ein kleineres r resultiert.

Eine Erhöhung des hydraulischen Gradienten bewirkt, dass die Feinpartikel infolge des grösseren Strömungsdrucks tiefer in die Filterschicht eingetragen werden und damit mehr Schwebstoffpartikel zur Erreichung eines bestimmten Filterwiderstandes erforderlich sind.

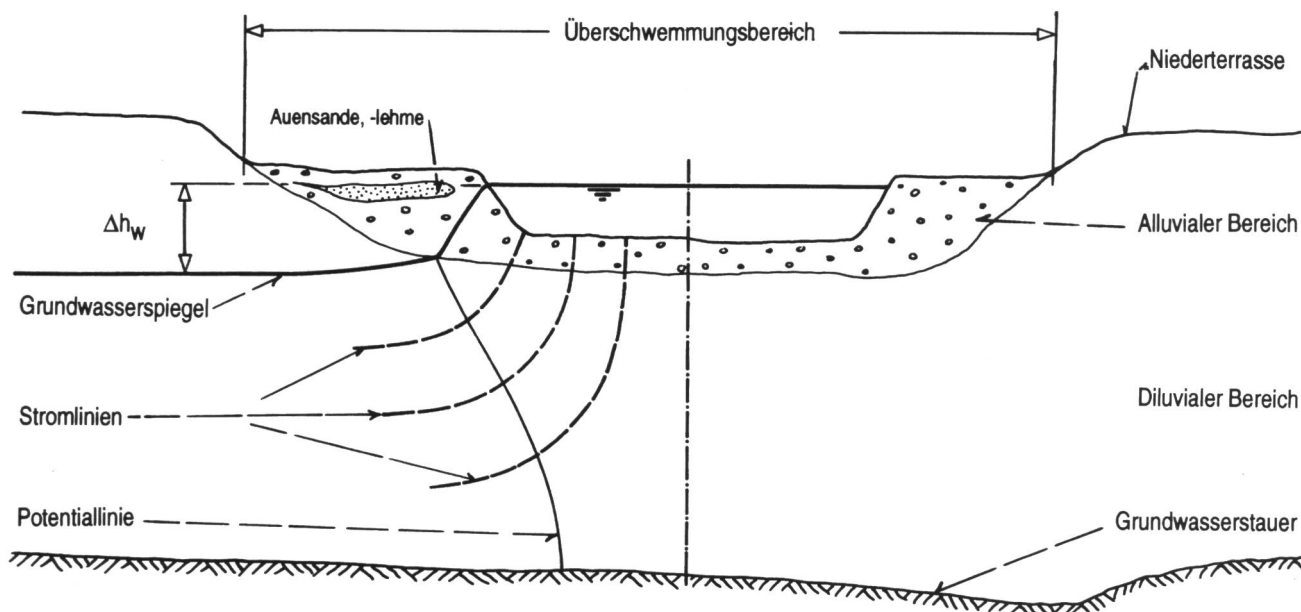


Bild 7a. Talquerschnitt mit Gewässersohle im unkolmatierten Zustand.

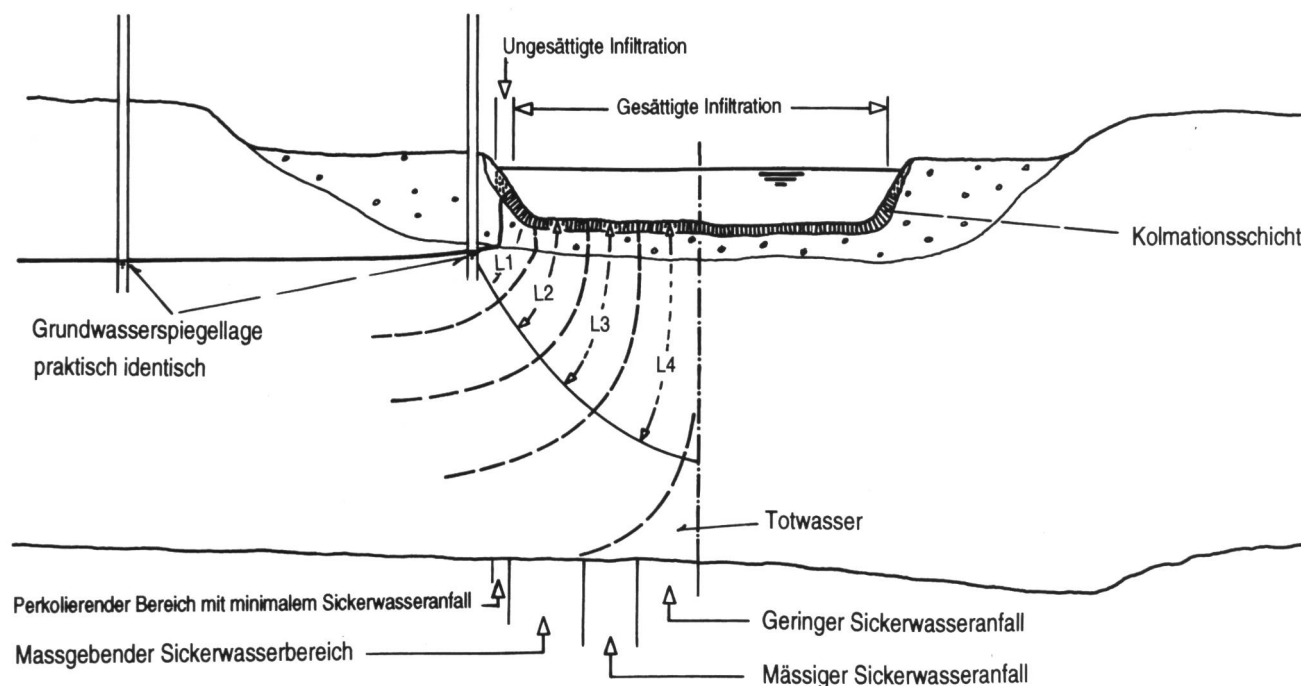


Bild 7b. Talquerschnitt mit Gewässersohle im kolmatierten Zustand.

Der Einfluss der *dimensionslosen Sohlenschubspannung* deckt sich mit der Beobachtung, dass bei höheren Abflüssen und damit grösseren turbulenzbedingten Schubspannungsschwankungen die Feinpartikel in Oberflächennähe dichter gelagert werden. Dieser Effekt wird durch ein leichtes Vibrieren der Deckschichtkörner verstärkt. Gemäss Gleichung 8 ändert sich r mit der Wurzel von Θ , der Einfluss dieser Variablen kann damit als eher gering bezeichnet werden.

Werden die Gleichungen 7 und 8 in Gleichung 6 eingesetzt, so ergibt sich die *Kolmationsgleichung*

$$V_A = A_F \frac{-\frac{Lg}{k_0 v} + \sqrt{\left(\frac{Lg}{k_0 v}\right)^2 + \frac{1.0 \cdot 10^{13} \Theta^{0.5} C \Delta h_w g t}{(d_{10}/d_m)^3 Re^{1.5} i v}}}{\frac{5.0 \cdot 10^{12} \Theta^{0.5} C}{(d_{10}/d_m)^3 Re^{1.5} i}} \quad (9)$$

mit welcher der integrierte Sickerabfluss für einen Zeitpunkt t berechnet werden kann.

Der Durchlässigkeitsbeiwert kann mit r – ohne vorherige Bestimmung von V_A – ermittelt werden aus

$$k = \frac{gL}{v(r m_K + \beta)} = \frac{gL}{v\left(r \frac{V_A C}{A_F} + \beta\right)} = \frac{gL}{v\sqrt{\beta^2 + 2 r C \Delta h_w g t} \frac{1}{v}} \quad (10)$$

Eine Schwierigkeit von Gleichung 8 besteht in der Bestimmung des massgebenden hydraulischen Gradienten. i wird bestimmt durch die Druckdifferenz zwischen dem Gerinnwasserspiegel und einem massgebenden Ort im Strömungsfeld zwischen Gerinne- und Grundwasser sowie durch die dazwischenliegende Sickerweglänge. Daher ist für eine korrekte Abschätzung von i die Kenntnis der örtlichen Strömungsverhältnisse im unmittelbaren Grenzbe- reich zur Gewässersohle von zentraler Bedeutung.

Bild 7a zeigt einen Talquerschnitt mit dem Grundwasserstauer, dem Grundwasserleiter und dem Fliessgewässer. Das Fliessgewässer befindet sich im *alluvialen Überschwemmungsbereich*, dessen Morphologie und Kornzusammensetzung durch die jüngeren Aktivitäten des Gewässers geprägt sind. Die Mächtigkeit dieses alluvialen Bereichs ist von der Geschichte des Fliessgewässers abhängig, welche bei stetiger Auflandung im Bereich des Talwegs mehrere Meter erreichen und bei Fliessgewässern mit genereller Eintiefungstendenz nur gerade die Gewässersohle selbst betreffen dürfte. Die Durchlässigkeit des alluvialen Bereichs wird durch die Kornverteilung des Sohlenmaterials repräsentiert. Unter diesem alluvialen Bereich befindet sich der eigentliche *Grundwasserleiter*, der in der Regel *diluvial abgelagert* worden ist und meist eine deutlich höhere Durchlässigkeit aufweist. Die Infiltration von Flusswasser erfolgt demnach durch eine geschichtete Matrix mit anfänglich kleinerer und in der Tiefe grösserer Durchlässigkeit, wobei der Unterschied häufig bei einem Faktor zwischen 10 und 50 liegen dürfte. Der angeschlossene Grundwasserspiegel wird daher entsprechend Bild 7a in unmittelbarer Nähe des Fliessgewässers rasch abfallen und weiter unten, im diluvialen Bereich, sehr flach verlaufen.

Mit der Kolmation der Gewässersohle wird eine dritte Schicht mit geringer Mächtigkeit gebildet, deren Durchlässigkeit deutlich tiefer ist als diejenige des alluvialen Bereichs (Bild 7b). Das Infiltrat durchströmt jetzt zwei Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit, bevor es das eigentliche Medium des Grundwasserleiters erreicht. Mit fortschreitender Kolmation konzentriert sich dementsprechend der Abbau der Potentialdifferenz zwischen Gerinne- und Grundwasserspiegel zunehmend auf eine dünnere Schicht nahe der Gerinneberandung.

Im kolmatierten Zustand wird sich bei sonst angeschlossenen Grundwasserspiegel nahe der Uferlinie ein Bereich ausbilden, wo das Flusswasser perkolutiv versickert. Die hier zur Verfügung stehende Druckhöhe reicht nicht aus, um die kolmatierte Filterschicht gesättigt zu durchströmen.

Aufgrund dieser qualitativen Kenntnisse kann zwischen dem Gerinne und dem Grundwasser ein Strömungsnetz entsprechend Bild 7b gezeichnet werden. Dabei fällt auf, dass der hydraulische Gradient im Uferbereich wegen der kleinen Sickerlänge (vgl. Bild 7b: L1, L2) am grössten ist und gegen die Gerinnemitte hin abnimmt (Bild 7b: L3, L4). Dieser Unterschied hat vor allem bei schmalen Grundwasserleitern einen massgebenden Einfluss, das heisst, dass in diesem Fall der Uferbereich viel, der zentrale Gerinnebereich hingegen wenig zum Sickervolumen beiträgt.

Zudem kommt, dass der grössere hydraulische Gradient und die geringe Sohlenschubspannung im Uferbereich die Kolmation verzögern und damit den oben erwähnten Unterschied zwischen den einzelnen Infiltrationsbereichen verstärkt (vgl. Gleichung 8). Diese Zusammenhänge zeigen, dass während der Kolmationsentwicklung der untere Böschungs- und der angrenzende Sohlenbereich den Hauptteil am Sickerwasservolumen liefern dürften. Dieser Effekt wird bei abgeschlossener Kolmation etwas relativiert, als sowohl grössere Gradienten als auch kleinere Sohlenschubspannungen zu einem tieferen Grenzwert der Kolmation führen (vgl. Problemkreis 3).

Dennoch kann gefolgert werden, dass in einem Querprofil die Sickerraten markant variieren können. Das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Variablen kann kaum im voraus, sondern nur durch eine differenzierte streifenweise Berechnung des hydraulischen Gradienten und der Kolmationsentwicklung beschrieben werden.

Für eine vereinfachte Berechnung kann auch von einem mittleren hydraulischen Gradienten ausgegangen werden. Die Druckhöhendifferenz Δh_w ergibt sich aus dem Gerinnewasserspiegel und der in Ufernähe beobachteten Grundwasserspiegellage. Für die Bestimmung der massgebenden Sickerweglänge ist die Grundwasserspiegellage bis unter die Uferlinie zu verschieben, wonach über ein Stromliniennetz die mittlere Sickerweglänge geschätzt wird. Aus den zwei Grössen Δh_w und L lässt sich der gesuchte hydraulische Gradient bestimmen.

Der Gültigkeitsbereich von Gleichung 8 wird durch den Schwankungsbereich der Versuchsparameter wie folgt eingegrenzt:

$$\begin{aligned} 0,0115 \leq d_{10}/d_m \leq 0,178 \\ 0,008 \leq C \leq 1,2 \\ 2400 \leq Re \leq 24800 \\ 0 < i \leq 0,93 \\ \Theta_0 < \Theta < \Theta_K \end{aligned}$$

Der Gültigkeitsbereich der dimensionslosen Sohlenschubspannung Θ wird eingegrenzt durch einen unteren Wert, wo die äussere Kolmation beginnt (Θ_0) und einen oberen Wert, wo die Dekolmation der Sohle einsetzt (Θ_K , vgl. Problemkreis 5).

3.4 Problemkreis 3: Grenzwert der Kolmation

Einige der länger dauernden Rinnenversuche haben gezeigt, dass die Durchlässigkeit der Gewässersohle nicht unbeschränkt abnimmt, sondern dass ein unterer Grenzwert der Kolmation erreicht wird (vgl. auch *Banscher*, 1976, *Hansel*, 1967). Dabei befindet sich der massgebende Kolmationshorizont mit der geringsten Durchlässigkeit an der Grenze zwischen der Filter- und der Deckschicht. Bei diesem Grenzzustand können keine zusätzlichen Feinpartikel in der Filterschicht abgelagert werden, denn infolge der Strömungsbeanspruchung besteht ein Gleichgewicht zwischen sich ablagernden und resuspendierten Partikeln.

Der Grenzwert der Kolmation ist abhängig von denselben Einflussgrössen, wie sie bereits für die Kolmationsentwicklung (Problemkreis 2) erkannt worden sind. Der resultierende Grenzwert des Gesamtfilterwiderstandes $\gamma_{max} = \alpha_{max} + \beta$ wird damit eine Funktion der fünf dimensionslosen Grössen d_{10}/d_m , Re , C/ρ_w , i und Θ :

$$\gamma_{max} = \frac{3,3 \cdot 10^{11} \left(\frac{d_{10}}{d_m} \right)^{5/4} Re i^{5/2} \left(\frac{C}{\rho_w} \right)^{3/4}}{\Theta} \quad (11)$$

Der minimale Durchlässigkeitsbeiwert k_{min} ist umgekehrt proportional zu γ_{max} und lässt sich berechnen aus

$$k_{min} = \frac{h_K g}{\gamma_{max} V} \quad (12)$$

Der Einfluss der fünf Variablen von Gleichung 11 kann wie folgt gedeutet werden:

Mit zunehmender *Kornverteilung* – und damit kleinerem d_{10}/d_m – nimmt γ_{max} ab. Der Grund für diesen Effekt liegt darin, dass bei breiterer Kornverteilung die Feinpartikel weniger tief in die Filterschicht eingetragen werden und damit eine Kolmationsschicht geringerer Mächtigkeit gebildet wird.

Der Einfluss der *Reynoldszahl* und des *hydraulischen Gradienten* wirken sich in sehr ähnlicher Weise aus. Sowohl bei höheren Wassertemperaturen wie auch bei grösseren hydraulischen Gradienten werden die Feinpartikel infolge einer höheren Filtergeschwindigkeit tiefer in die Filterschicht eingetragen. Dadurch können mehr Schwebstoffe im Porenraum abgelagert werden, bevor der Grenz-

wert der Kolmation erreicht ist. Die Durchlässigkeit erreicht unter diesen Verhältnissen einen tieferen Grenzwert.

Das Ausmass der Feinpartikelablagerungen in den Spalten und Zwischenräumen der Deckschicht ist sowohl von der *Schwebstoffkonzentration* als auch von der *dimensionslosen Sohlenschubspannung* abhängig. Dabei wird in Abhängigkeit dieser zwei Variablen ein Gleichgewichtszustand zwischen den sich ablagernden und den resuspendierten Partikeln angestrebt. Eine höhere Schwebstoffkonzentration und eine kleinere dimensionslose Sohlenschubspannung ermöglichen eine vermehrte Ablagerung von Feinpartikeln, was eine Reduktion von k_{min} zur Folge hat. Umgekehrt führen kleinere C/ρ_w und grössere Θ zu einer teilweisen Erosion bestehender Feinmaterialablagerungen und damit zu einer Erhöhung von k_{min} .

Ganz allgemein kann gesagt werden, dass der natürliche Schwankungsbereich des Grenzwerts der Kolmation recht gross ist und massgebend von den Variablen d_{10}/d_m , C , i und Θ abhängig ist. Daneben bewirkt jedoch auch eine Änderung der Wassertemperatur von beispielsweise 15°C noch eine Variation von k_{min} um einen Faktor zwei. Dieser Fall zeigt, dass die Durchlässigkeit einer kolmatierten Sohle – einzig aufgrund der jährlichen Temperaturschwankungen – in den wärmeren Sommermonaten halbiert werden kann.

3.5 Problembereich 4: Vollständige Dekolmation

Bei einem Anstieg der Sohlenschubspannung nimmt – ab einem bestimmten Schwellenwert Θ_k – die Durchlässigkeit einer vorgängig kolmatierten Fliessgewässersohle wieder zu. Dieser Schwellenwert kennzeichnet den *Dekolmationsbeginn*. Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass die Deckschicht bei diesem Schwellenwert noch stabil ist. Damit die Durchlässigkeit der Filterschicht wieder den Maximalwert k_0 erreicht, ist hingegen ein Aufreissen der Deckschicht und damit das Erreichen des Grenzwerts der Deckschichtstabilität Θ_0 erforderlich.

Weil der oben erwähnte Schwellenwert Θ_k eine Funktion von Θ_0 ist, werden im folgenden zuerst die Prozesse und Berechnungsgrundlagen für das Aufreissen der Deckschicht beschrieben. Der Dekolmationsbeginn und die dabei zu erwartende Zunahme des k -Werts ist Gegenstand von Abschnitt 3.6.

Mit dem Erreichen der Grenzbelastung der Deckschicht werden anfänglich einzelne, meist exponierte Körner aus dem Deckschichtverbund herausgelöst und gerinneabwärts verfrachtet. Gleichzeitig mit der Entfernung eines oder mehrerer Deckschichtkörner wird der oberflächennahe Kolmationshorizont verletzt und die darunterliegende Filterschicht der Erosion preisgegeben. Das örtliche Aufreissen der Deckschicht führt damit meistens zu einer Erneuerung der gesamten Filterschicht. Dieser Erosionsprozess kann wieder zum Stillstand kommen, falls sich durch die Reduktion des lokalen Gefälles oder durch die Verfügbarkeit genügend vieler und grosser Körner, eine neue stabile Deckschicht ausbildet. Beim Erreichen oder knappen Überschreiten von Θ_0 ist demnach mit einer lokalen Erhöhung des k -Werts auf den Maximalwert k_0 zu rechnen, wobei sich dieser Prozess bei anhaltend konstanten Verhältnissen zunehmend auf die gesamte Sohle ausdehnt. Bei einem deutlichen Überschreiten von Θ_0 wird dieser Prozess beschleunigt, die Deckschicht wird in kurzer Zeit vollständig aufgerissen, die Gewässersohle kommt flächenhaft in Bewegung und die Filterschicht wird gesamthaft gespült und neu gebildet. Die Durchlässigkeit erreicht grossflächig den Maximalwert k_0 (Gleichungen 2 bis 4).

Die diesbezüglichen Hochwasserversuche in der Rinne haben gezeigt, dass die Sohlenschubspannung, welche für das Erreichen der maximalen Durchlässigkeit k_0 erforderlich ist, mit dem Verfahren von Gessler und Günter abgeschätzt werden kann. Gessler (1965) beschreibt ein Verfahren, mit dem, ausgehend von der Kornverteilung der Unterschicht und in Funktion der Sohlenschubspannung, die Vergröberung der Deckschicht berechnet werden kann. Dabei lässt sich auch diejenige (gröbste) Kornverteilung bestimmen, die sich unmittelbar vor dem Aufreissen der Deckschicht bildet. Ausgehend von dieser Mischung, die einen mittleren Korndurchmesser d_{mDmax} aufweist, lässt sich nach einem vereinfachten Ansatz von Günter (1971) die bezüglich der Grenzbelastung der Deckschicht massgebende dimensionslose Sohlenschubspannung Θ_0 berechnen:

$$\Theta_D = \Theta_{cr} \left(\frac{d_{mDmax}}{d_{mA}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,05 \left(\frac{d_{mDmax}}{d_{mA}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

Θ_{cr} ist die dimensionslose Sohlenschubspannung bei Geschiebetriebbeginn, sie nimmt unter der Voraussetzung vollturbulenter Sohlenströmung (hydraulisch rauhe Sohle) mit $Re^* > ca. 70$ einen Wert um 0,05 an. Gemäss Gleichung 13 ist damit Θ_0 einzig von den Kornverteilungen der Ausgangsmischung (Unterschicht) und der Deckschicht abhängig, das heisst Θ_0 ist eine Materialkonstante.

3.6 Dekolmationsbeginn und Durchlässigkeitsanstieg

3.6.1 Dekolmationsprozesse

Die Dekolmation einer Gewässersohle setzt definitionsgemäss ein, wenn bei ansteigender Sohlenschubspannung die Durchlässigkeit erstmals zunimmt. In der Versuchsrinne ist während jedes Hochwasserversuchs die Änderung der Durchlässigkeit erfasst worden. Beobachtungen durch die verglaste Rinnenwand zeigten, dass die vier im folgenden beschriebenen Prozesse als Auslöser des Dekolmationsbeginns bezeichnet werden können.

1. Mit zunehmender Schleppkraft des Abflusses vergrössern sich die turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. Die damit induzierten Druckunterschiede können zu kleineren Positionsänderungen einzelner Deckschichtkörner führen. Dabei wird der darunterliegende Kolmationshorizont verletzt, was zu einer örtlichen Erhöhung des k -Werts führt.
2. Die Deckschicht weist im allgemeinen eine Kornverteilung auf, die gröber als das darunterliegende Sohlenmaterial, jedoch feiner als die gröbstmögliche Zusammensetzung ist, welche sich unmittelbar vor ihrem Aufreissen ausbilden würde (vgl. Abschnitt 3.5). Das heisst, dass in der Regel in einer Deckschicht feinere Körner enthalten sind, die bereits bei $\Theta < \Theta_0$ aus dem Deckschichtverbund herausgelöst werden, ohne dass dabei die Deckschichtstabilität beeinträchtigt würde. Der unter dem herausgelösten Deckschichtkorn liegende Kolmationshorizont wird dadurch verletzt, was zu einer Erhöhung der Sohlendurchlässigkeit führt.
3. Eine Erhöhung der Sohlenschubspannung gegen den Grenzwert Θ_0 führt zunehmend zu grösseren Instabilitäten des Deckschichtverbundes. Dabei kommt es häufig – ähnlich wie bei der Bildung eines Pfeilerkolkes – zu einer Unterspülung und anschliessendem Einsinken eines Deckschichtkorns, was zur Erosion der oberflächennahen Kolmationshorizonte und einer teilweisen Spülung der Filterschicht führt.
4. Bei größerem Sohlenmaterial mit breiter Kornverteilung ist häufig ein Transport von Feingeschiebe über die stabile Deckschicht zu beobachten. Dieser Vorgang kann zu

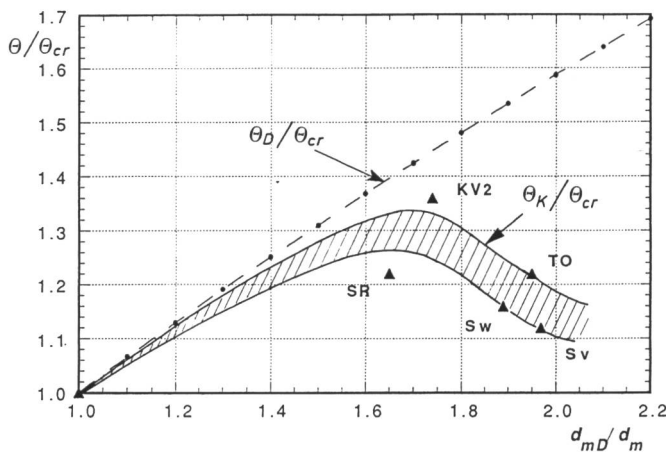


Bild 8. Wahrscheinlichster Bereich des Dekolmationsbeginns.

einer lokalen und teilweisen Dekolmation der Sohle führen, wobei die unter Abschnitt 4.4 beschriebenen Effekte den Durchlässigkeitsanstieg auslösen.

3.6.2 Problemkreis 5: Dekolmationsbeginn

Die in der Versuchsrinne durchgeführten Hochwasserversuche sind hinsichtlich des Dekolmationsbeginns ausgewertet worden. Dabei resultierte für jede untersuchte Sohlenmischung eine dimensionslose Sohlenschubspannung des Dekolmationsbeginns Θ_K .

In Bild 8 sind einerseits die Messwerte und andererseits die Bedingung von Günter eingezeichnet (gestrichelte Linie). Aufgrund der Versuchsergebnisse zeigt sich, dass mit zunehmender Kornverteilung das Verhältnis Θ_K/Θ_{cr} tendenziell abnimmt. Das heisst, dass unter diesen Verhältnissen der Dekolmationsbeginn vergleichsweise früher einsetzt und zunehmend mit dem Geschiebetriebbeginn des Sohlenmaterials ($\Theta_K/\Theta_{cr} = 1$) zusammenfällt. Als weitere Randbedingung muss – weil bei Θ_D die Deckschicht aufzureissen beginnt – für alle Sohlenmischungen die Bedingung $\Theta_K \leq \Theta_D$ erfüllt sein. Aufgrund dieser Zusammenhänge muss die Funktion $\Theta_K/\Theta_{cr} = f(d_mD/d_m)$ im schraffierten Bereich von Bild 8 liegen.

Damit ist für alle in Natur vorkommenden Mischungen der Dekolmationsbeginn einfach zu bestimmen. Θ_K ist – entsprechend Θ_D – eine Materialkonstante.

3.6.3 Problemkreis 6: Erhöhung der Durchlässigkeit beim Erreichen des Dekolmationsbeginns

Beim Erreichen des Dekolmationsbeginns nimmt die Durchlässigkeit nicht gleichmässig verteilt über die Sohle zu. Die Erhöhung der Durchlässigkeit erfolgt vielmehr punktuell an denjenigen Stellen, wo die Dekolmationsprozesse gemäss Abschnitt 3.6.1 zu beobachten sind. Die Durchlässigkeit erreicht dabei lokal einen Wert, der nahe bei k_0 liegt. An allen übrigen Stellen ist hingegen eine weiterführende Kolmation zu erwarten. Die Durchlässigkeit k dieser letzteren Stellen, wo der k -Wert weiter abnimmt, dürfte für die Erhöhung des durchschnittlichen k -Werts der Dekolmation massgebend sein. Je weiter fortgeschritten die Kolmation beim Einsetzen der Dekolmation ist, desto stärker wird die Erhöhung der Durchlässigkeit ausfallen.

In Bild 9 sind für die ausgewerteten Dekolmationsversuche die dimensionslosen Durchlässigkeitsverhältnisse vor und nach dem Dekolmationsbeginn k/k_0 und k_{ek}/k_0 gegeneinander aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass die Versuchsergebnisse in doppeltlogarithmischer Darstellung sehr gut durch eine Gerade angenähert werden können. Zudem

muss als Randbedingung die Kurve von $k_{ek}/k_0 = f(k/k_0)$ durch den Punkt (1;1) verlaufen. Nach dem Ausscheiden der schlechtesten fünf Messwerte ergibt sich als beste Lösung mit $R = 0,95$

$$\frac{k_{\Theta_K}}{k_0} = \left(\frac{k_i}{k_0}\right)^{0,736} \equiv \left(\frac{k_i}{k_0}\right)^{3/4} \quad (14)$$

Entsprechend Bild 9 steigt die Durchlässigkeitserhöhung mit abnehmendem k_i von null bis zu etwa einem Faktor 10 an (kleinere Verhältniszahlen als $k_i/k_0 = 10^{-4}$ kommen in Natur kaum vor). Gleichung 14 bietet damit die Möglichkeit, für den Zeitpunkt des Erreichens oder Überschreitens von Θ_K den Durchlässigkeitsanstieg zu berechnen.

4. Spezialfälle

Die bisherigen Betrachtungen zur Abschätzung der Kolmationsentwicklung, des Grenzwerts der Kolmation und des Durchlässigkeitsanstiegs beim Dekolmationsbeginn beruhen auf der Annahme folgender Randbedingungen:

- *Infiltration*: Der Gerinnewasserspiegel liegt höher als der Grundwasserspiegel.
- *Gesättigte Verhältnisse*: Der Grundwasserspiegel ist an das Gerinne angeschlossen.
- *Kein Geschiebetransport*.

Häufig sind jedoch davon abweichende Verhältnisse und variable Randbedingungen anzutreffen, wobei die vier in den folgenden Abschnitten behandelten Fragestellungen von zentralem Interesse sind.

4.1 Ungesättigte Infiltration

Bei der ungesättigten Infiltration liegt der Grundwasserspiegel so weit unter der Gewässersohle, dass sich ein Teil des dazwischenliegenden Porensystems mit Luft füllt und der Druck des Porenwassers unter denjenigen der Atmosphäre absinkt. Durch die Kolmation der Gewässersohle wird dieser Prozess beschleunigt, wobei die Druckdifferenzhöhe Δh_w zunehmend in der Kolmationsschicht abgebaut wird. Im darunterliegenden Boden kann – bis in den vom Grundwasserspiegel beeinflussten Bereich – etwa ein Gradient von $i = 1$ beobachtet werden.

Demgegenüber nimmt der für die Kolmation massgebende Gradient einen deutlich höheren Wert an, der sich zudem mit fortschreitender Kolmation vergrössert. Bei den diesbezüglich durchgeführten Rinnenversuchen sind Gradienten zwischen 1,2 und 1,8 mit kleinen spezifischen Filterwiderständen $r = 6 \cdot 10^{10}$ bis $8 \cdot 10^{10}$ m/kg beobachtet worden. Grundsätzlich bedeutet dies, dass bei ungesättigter Infiltration die Kolmation langsamer abläuft als unter gesättigten Verhältnissen, im Grenzzustand jedoch ein tieferer Durchlässigkeitsbeiwert erreicht wird.

Für die praktische Anwendung ist versucht worden, aus den durchgeführten Rinnenversuchen eine Faustformel zur Bestimmung des hydraulischen Gradienten herzuleiten, welche auf den zwei bekannten Grössen Abfluss- und Kolmationstiefe beruht. Gemäss diesem Ansatz wird über einer Tiefe von $3 \cdot h_k$ die Druckdifferenz $\Delta h_w = h_w$ abgebaut. Der hydraulische Gradient berechnet sich dementsprechend aus

$$i = \frac{h_w + 3 h_k}{3 h_k} \quad (15)$$

Für die in der Rinne durchgeführten Versuche ($h_k = 70$ mm, $h_w = 0,12$ m) werden mit Gleichung 15 gute Resultate erzielt. Es sind jedoch zuwenig Versuche durchgeführt worden, um die Gleichung auch für andere Kombinationen von h_w und h_k zu verifizieren.

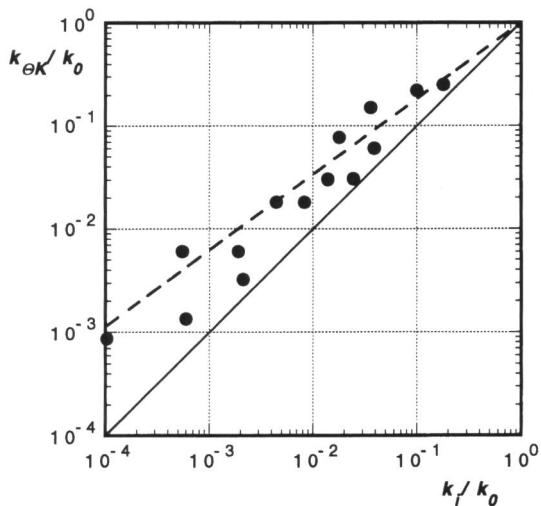


Bild 9. Relative Durchlässigkeit beim Erreichen der Dekolmation in Funktion des zuvor beobachteten Durchlässigkeitsverhältnisses.

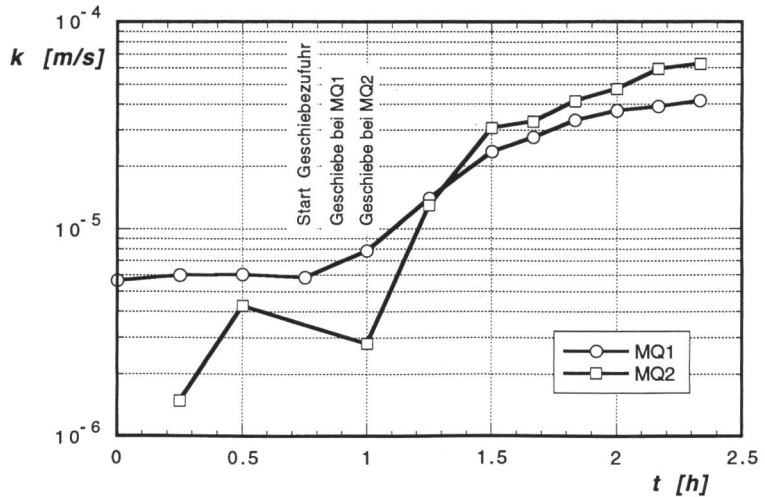


Bild 10. Durchlässigkeitsanstieg beim Feingeschiebetransport.

Basierend auf Gleichung 15 lässt sich die Kolmationsentwicklung aus der für den gesättigten Fall hergeleiteten Gleichung 9 abschätzen. Der Filterwiderstand β des unkolmatierten Sohlenmaterials wird mit $L = 3 h_a$ berücksichtigt.

Dieser Berechnungsansatz beruht auf stark vereinfachten Randbedingungen. Beispielsweise wird ausser acht gelassen, dass mit fortschreitender Kolmation die abgebaute Druckdifferenz zunimmt und sich damit die Grössen Δh_w und i mitverändern. Ferner wird vernachlässigt, dass zumindest zu Beginn der Kolmation die stark reduzierte Durchlässigkeit der ungesättigten Zone ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf die Sickerwasserverhältnisse ausübt. Aus diesen Gründen kann der vorliegende Ansatz bloss einen groben Anhaltspunkt betreffend die Kolmationsentwicklung bieten.

4.2 Grundwasser-Exfiltration

Bei der Exfiltration von Grundwasser strömt das Bodenwasser durch das Porensystem der Sohle in das Fließgewässer. Diese Strömung hemmt die Ablagerung und den Eintrag von Feinpartikeln im Sohleninneren. Für den Eintrag eines Partikels muss seine Gravitationskraft grösser sein als die aus der Sohle gerichtete Strömungskraft. Mit wachsender Porengeschwindigkeit werden damit zunehmend nur noch gröbere Partikel abgelagert. Für laminar umströmte Kugeln kann abgeschätzt werden, dass bei Porengeschwindigkeiten $v_p > 4 \cdot 10^{-6}$ m/s keine Tonpartikel und für $v_p > 10^{-2}$ m/s nur noch Partikel mit $d > 0,15$ mm zur Ablagerung kommen können. Weil für die Durchlässigkeitsabnahme und die Verfestigung einer Sohle ausschliesslich die kohäsiven Partikel der Ton- und Siltfraktion massgebend sind, bedeutet dies, dass die Kolmation bei genügend starker Exfiltration verhindert wird.

Aufgrund der zwei durchgeführten Rinnenversuche, wo einerseits die Kolmationsentwicklung unter schwach exfiltrierenden Verhältnissen, andererseits die Änderung der Durchlässigkeit bei einem Wechsel von infiltrierend zu exfiltrierend untersucht worden sind, lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

- Die innere Kolmation einer Fließgewässersohle wird bei der Exfiltration von Grundwasser verhindert, sofern ein (für das Sohlenmaterial charakteristischer) Grenzwert des hydraulischen Gradienten erreicht wird. Für das untersuchte Sohlenmaterial SR (vgl. Bild 4) liegt dieser Grenzwert bei rund $i = -0,15$.

- Bei einem Wechsel der Sickerströmung von infiltrierend zu exfiltrierend kommt es einerseits durch den Austritt von Luft, andererseits durch den aus der Sohle gerichteten Strömungsdruck zu einer Dekolmation der Sohle. Dabei kann die Durchlässigkeit rasch um einen Faktor 10 ansteigen. Bei stark exfiltrierenden Verhältnissen mit $i \leq -0,30$ kann längerfristig mit einer vollständigen Dekolmation der Sohle gerechnet werden (gilt wiederum nur für die untersuchte Mischung SR).
- Eine Erosion des feineren Anteils des Sohlenmaterials (Suffosion) konnte bis zu einem Gradienten von $i = -0,40$ nicht beobachtet werden.

4.3 Trockenfallen und Wiederbenetzung infolge von Wasserspiegelschwankungen

In einem Fließgewässer führen Abflussschwankungen zu einer Vergrösserung oder zu einer Reduktion des benetzten Gerinneprofiles. Bei flachen Böschungen oder bei im Schwankungsbereich des Wasserspiegels liegenden Kiesbänken kann dadurch ein flächenmässig bedeutender Anteil des Gerinneumfanges periodisch trockenfallen und wieder benetzt werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob die Kolmation durch diese Wasserspiegelschwankungen beeinflusst wird.

Grundsätzlich muss zwischen einer kurzfristigen, einer mittelfristigen und einer langfristigen Austrocknung unterschieden werden.

Ein kurzfristiges, wenige Tage andauerndes Absinken des Wasserspiegels führt zu keiner signifikanten Änderung der Durchlässigkeit. Bei einem Rinnenversuch zeigte sich, dass der k -Wert nach zweitägiger Austrocknung bei der Wiederbenetzung relativ rasch (nach ca. 1 Stunde) auf denjenigen Wert angestiegen ist, der vor der Austrocknung zu beobachten war. Der Angleich an den früheren Wert dauert so lange, bis die Luft in den Poren verdrängt worden ist und sich wieder gesättigte Verhältnisse eingestellt haben.

Nach einer mittelfristigen Austrocknung von einigen Tagen bis Wochen steigt die Durchlässigkeit anfänglich auf einen höheren Wert an, um anschliessend nach kurzer Zeit (wenige Stunden) wieder auf den Wert vor der Austrocknung abzusinken (Matlock, 1965). Es ist anzunehmen, dass während der Austrocknung die Kolmationsmasse infolge von Wasserverlusten leicht schwindet und sich die Querschnitte der noch offenen Porenkanäle vergrössern. Nach der Wiederbenetzung quellen diese Feinmaterialablagerun-

gen wieder auf, so dass dieser Effekt bereits nach kurzer Zeit wirkungslos wird.

Während einer langfristigen Austrocknung von mehreren Wochen bis Monaten führen die Wasserverluste zu einer irreversiblen Verformung der Kolmationsmasse. Dabei werden die abgelagerten Feinpartikel näher an das Korngerüst angelagert, wodurch die Porenkanäle vergrößert werden und der Kolmationshorizont örtlich durch Riss- und Spaltenbildung unterbrochen wird (Berend, 1967, Beyer & Banscher, 1975). Die Durchlässigkeit erhöht sich damit markant und kann – bei der Wiederbenetzung – annähernd den maximalen Wert k_0 erreichen. Bei der neu einsetzenden Kolmation müssen diese bevorzugten Sickerkanäle zuerst durch zusätzliches Feinmaterial abgedichtet werden. Die Durchlässigkeitserhöhung nach einer längerandauernden Austrocknung wirkt sich demnach nachhaltig aus und kann einen bedeutenden Einfluss auf den Sickerwasserabfluss ausüben.

4.4 Feingeschiebetransport

Als Feingeschiebetransport wird die Bewegung von vergleichsweise feinem Geschiebe über die stabile gröbere Deckschicht verstanden. Dieses Phänomen ist vor allem in den mit größerem Material angereicherten voralpinen und alpinen Fließgewässern anzutreffen. Im Zusammenhang mit der Kolmation solcher Gewässersohlen stellt sich die Frage, ob der Transport dieses Feingeschiebes einen signifikanten Einfluss auf die Durchlässigkeitsentwicklung ausübt.

Zur Untersuchung dieses Phänomens ist in einem Versuch im Einlaufbereich der Rinne kontinuierlich Feingeschiebe ($d_m = 6,4$ mm) zudosiert worden. Entsprechend den dabei gemachten Beobachtungen wird die Sandfraktion dieses Materials als Schweb rasch gerinneabwärts verfrachtet, wobei ein Teil im Strömungsschatten grösserer Deckschichtkörner abgelagert wird. Das gröbere Material (Kiesfraktion) wird entsprechend der klassischen Geschiebetheorie rollend, gleitend oder springend über die Deckschicht transportiert. Das Geschiebe prallt dabei immer wieder gegen einzelne Deckschichtkörner oder fällt in Zwischenräume, wo der Kolmationshorizont die Sohlenoberfläche erreicht.

Für die Dekolmation infolge eines Feingeschiebetransports dürften die folgenden drei Prozesse massgebend sein:

1. Die Verletzung des Kolmationshorizontes durch den direkten Aufprall eines Geschiebekorns.
2. Die Erschütterung und eventuell leichte Verschiebung eines Deckschichtkorns durch den Aufprall eines Geschiebekorns mit der Folge, dass der angrenzende Kolmationshorizont verletzt wird.
3. Die Abrasion von kohäsiven Feinmaterialablagerungen durch die kontinuierliche Einwirkung von im Abfluss enthaltenen Sandkörnern (Sandstrahleffekt). Dieser Prozess scheint jedoch von untergeordneter Bedeutung zu sein, da eine signifikante Erhöhung des k -Werts erst mit Erreichen der Geschiebefront zu verzeichnen ist.

Entsprechend Bild 10 führt der Feingeschiebetransport zu einem markanten Anstieg der Durchlässigkeit, und zwar beginnend in exakt dem Moment, wo die Geschiebefront den betrachteten Querschnitt erreicht. Der k -Wert steigt anfänglich massiv an, worauf er zunehmend verzögert einen oberen Grenzwert anzustreben scheint. Im vorliegenden Beispiel wird eine Durchlässigkeit erreicht, die 10 bis 15 % von k_0 entspricht. Es muss davon ausgegangen werden, dass dieser Wert sowohl vom Verhältnis der zwei Mi-

schungen des Sohlenmaterials und des Feingeschiebes als auch von der aktuellen Sohlenschubspannung abhängig ist und damit eine Übertragung dieses Resultats auf andere Fälle nur qualitative Gültigkeit hat.

5. Schlussbemerkungen

Die Kolmation von Fließgewässersohlen ist ein Phänomen, das sich im Umfeld zwischen Fließgewässer und Grundwasser abspielt. Zum Verstehen dieses Phänomens sind Kenntnisse der Sachgebiete Flusshydraulik, Geschiebemechanik, Grundwasserhydraulik und Filtrationstheorie nötig. Entsprechend diesem breiten Grundlagenwissen mit verschiedenen Einflussgrößen ist die Kolmation durch physikalische Gleichungen nur schwer zu beschreiben. Dennoch, in der vorliegenden Forschungsarbeit ist es gelungen, durch Laborversuche den Einfluss der massgebenden Variablen zu erkennen und durch multiple Regression mathematisch zu formulieren. Dabei darf die scheinbar exakte Bestimmung der Koeffizienten nicht darüber hinwegtäuschen, dass die konkreten Resultate eine zum Teil beträchtliche Streuung aufweisen.

Voraussetzung für einen praxisorientierten Lösungsansatz ist, dass die massgebenden Kolmationsprozesse im Labor möglichst naturnah nachgebildet werden. Wegen der vielfältigen Einflüsse, die den Versuchsablauf mitbestimmen, ist eine Vielzahl von Versuchen erforderlich, damit die Wirkungen der verschiedenen Einflussgrößen richtig erkannt werden können. Zudem ist die Kenntnis der im Sohleninnern ablaufenden Phänomene erforderlich, zu deren Verständnis die Filtrationstheorie Hand geboten hat. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse ist – gegenüber der traditionellen Grundlagenforschung – mit einer grösseren Streuung zu rechnen, wobei nicht für jeden Ausreisser eine Erklärung gefunden werden kann. Dieses Vorgehen macht es jedoch möglich, für bisher in ihrem Ganzen nur unvollständig erkannte Phänomene einen praxisrelevanten Lösungsansatz herzuleiten, der einerseits das Zusammenspiel der einzelnen Variablen physikalisch korrekt wiedergibt und andererseits brauchbare Resultate liefert. Der Nutzen dieses Vorgehens sind Lösungen für komplexe Problemstellungen, die in verschiedenen Gebieten dringend benötigt werden.

Dank

Die in der vorliegenden Arbeit zusammengestellten Berechnungsgrundlagen sind im Rahmen einer Dissertation an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich anhand von Rinnenversuchen hergeleitet worden. Ich möchte Prof. Dr. D. Vischer, dem Leiter des Instituts, für die Förderung dieser Forschungsarbeit und die Unterstützung der vorliegenden Nachfolgepublikation ganz herzlich danken. Die umfassende Beschreibung der Forschungsarbeit wird zudem als VAW-Mitteilung veröffentlicht werden.

Literatur

- Banscher, E. (1976): Gesetzmässigkeiten der Kolmationsentwicklung. Wasserwirtschaft, Wassertechnik, (9), 320–323.
- Berend, J. E. (1967): An Analytical Approach to the Clogging Effect of Suspended Matter. Bull. Int. Ass. Scient. Hydrol., Vol. 12.
- Beschta, R. L.; Jackson, W. L. (1979): The Intrusion of Fine Sediments into a Stable Gravel Bed. J. Fish. Res. Board Canada, 36, 204–270.
- Beyer, W.; Banscher, E. (1975): Zur Kolmation der Gewässerbetten bei der Uferfiltratgewinnung. Zeitschrift f. angewandte Geologie, Berlin, Vol. 21, H. 12.
- Cunningham, A. B.; Anderson, C. J.; Bouwer, H. (1987): Effects of Sediment-Laden Flow on Channel Bed Clogging. J. of Irrigation and Drainage Eng., ASCE, Vol. 113, No. 1, 106–118.

Diplas, P. A. (1986): Pollution of Gravel Spawning Grounds Due to Fine Sediment. A thesis submitted to the faculty of the graduate school of the Univ. of Minnesota.

DVWK Schriften 58/1 (1982): Ermittlung des nutzbaren Grundwasserangebots. Verlag Paul Parey.

Gessler, J. (1965): Der Geschiebetrriebbeginn bei Mischungen untersucht an natürlichen Abpflästerungserscheinungen in Kanälen. Mitt. Nr. 69, Versuchsanst. Wasserbau u. Erdbau, ETH Zürich, 67 S.

Günter, A. (1971): Die kritische mittlere Sohlschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlschubspannungsschwankungen. Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 3.

Hansel, H. (1967): Über natürliche Selbstdichtung von Gewässern mit porösem Untergrund und ihre hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Auswirkungen. Wiss. Z. der Hochschule f. Bauwesen, Leipzig, H. 4.

Herzig, J. P.; Leclerc, D. M.; Le Goff, P. (1970): Flow of Suspensions through Porous Media – Application to Deep Filtration. Industr. and Eng. Chem., Vol. 62, No. 5, pp. 8–35.

Ingerle, K. (1991): Über die Flussbettdurchlässigkeit und die Sauerstoffzehrung des Uferfiltrats im Staubereich von Donaukraftwerken. Wasserrwirtschaft 81, H. 9, 415–422.

Jussel, P. (1992): Modellierung des Transports gelöster Stoffe in inhomogenen Grundwasserleitern. Inst. für Hydromech. und Wasserwirtschaft ETH Zürich, R 29–92.

Kozeny, J. (1953): Hydraulik. Springer Verlag, Wien.

Lisle, T. E. (1989): Sediment Transport and Resulting Deposition in Spawning Gravels, North Coastal California. Wat. Res. Res., Vol. 25, No. 6, 1303–1319.

Matlock, G. M. (1965): The Effect of Silt-Laden Water on Infiltration in Alluvial Channels. Thesis presented to the University of Arizona, Tucson, Arizona, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Schälchli, U. (1992): Kolmations- und Spülprozesse in Flusstauhaltungen. Beitrag zum Symposium «Betrieb, Unterhalt und Modernisierung von Wasserbauten» vom 29. bis 31. Okt. 1992 in Garmisch-Partenkirchen. Bericht Nr. 73 der VA Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der TU München.

Schälchli, U. (1993): Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen. Dissertation Nr. 10293 der ETH Zürich, im Druck (erscheint auch als VAW-Mitteilung).

VAW-Bericht 970/II (1990): Die Langetensohle. Im Auftrag des Hochwasserschutzverbandes unteres Langental, unveröffentlicht.

Symbole

A_F	[m ²]	Filteroberfläche, Sohlenoberfläche
C	[g/l]	Schwebstoffkonzentration
C_U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{10}	[m]	Charakteristischer Korndurchmesser, 10 % Gewichtsanteile des Sohlenmaterials sind kleiner
d_{60}	[m]	Definition entsprechend d_{10}
d_m	[m]	Mittlerer Korndurchmesser des Sohlenmaterials
d_{mA}	[m]	Mittlerer Korndurchmesser der Ausgangsmischung
d_{mD}	[m]	Mittlerer Korndurchmesser der Deckschicht
$d_{mD_{max}}$	[m]	Maximaler mittlerer Korndurchmesser der Deckschicht unmittelbar vor ihrem Aufreißen
d_{mi}	[m]	Mittlerer Korndurchmesser der Fraktion i
d_w	[m]	Wirksamer Korndurchmesser nach Kozeny
g	[m/s ²]	Gravitationskonstante, Erdbeschleunigung
h_k	[m]	Kolmationstiefe
h_w	[m]	Abflusstiefe
i	[-]	Hydraulischer Gradient der Sickerströmung

J	[-]	Energieliniengefälle
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy
k_0	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert des unkolmatierten Sohlenmaterials
k_{min}	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert im Grenzzustand der Kolmation
k_{ek}	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert beim Dekolmationsbeginn
L	[m]	Massgebende Sickerweglänge
m_K	[kg/m ²]	Kolmationsmasse pro Flächeneinheit
n	[-]	Porosität
r	[m/kg]	Spezifischer Filterwiderstand
Re	[-]	Reynoldszahl eines sinkenden, turbulent umströmten Partikels im ruhenden Wasser
Re^*	[-]	Kornreynoldszahl
s	[-]	Dichteverhältnis zwischen Sohlenmaterial und Wasser (2,65)
t	[s]	Zeit
V_A	[m ³]	Sickerwasservolumen
v_p	[m/s]	Porengeschwindigkeit
α	[m ⁻¹]	Filterwiderstand
α_{max}	[m ⁻¹]	Filterwiderstand im Grenzzustand der Kolmation
β	[m ⁻¹]	Filterwiderstand des unkolmatierten Filtermediums
γ	[m ⁻¹]	Gesamtwiderstand des Filtermediums
γ_{max}	[m ⁻¹]	Gesamtwiderstand des Filtermediums im Grenzzustand der Kolmation
γ_s'	[kg/m ² s ²]	Spezifisches Gewicht des Sohlenmaterials unter Wasser
Δp_G	[N/m ²]	Gesamtdruckdifferenz
Δp_i	[-]	Relative Häufigkeit der Fraktion i an der gesamten Mischung
ϵ	[-]	Porenziffer, $\epsilon = n / (1-n)$
η	[kg/ms]	Dynamische Zähigkeit
Θ	[-]	Dimensionslose Sohlschubspannung
Θ_0	[-]	Dimensionslose Sohlschubspannung, welche die Grenzbedingung zur Bildung einer äusseren Kolmation beschreibt
Θ_{cr}	[-]	Dimensionslose Sohlschubspannung bei Geschiebetrriebbeginn
Θ_D	[-]	Dimensionslose Sohlschubspannung beim Aufreißen der Deckschicht
Θ_K	[-]	Dimensionslose Sohlschubspannung beim Dekolmationsbeginn
ν	[m ² /s]	Kinematische Zähigkeit
ρ_w	[kg/m ³]	Dichte des Sickerwassers
τ	[kg/ms ²]	Schubspannung

Anschrift des Verfassers: Ueli Schälchli, Dr. Ing. ETH/SIA, Ingenieurbüro für Wasser und Umwelt, Stadelhoferstrasse 40, CH-8001 Zürich.