

7 Auswirkungen von Kolmation auf die vertikale Vernetzung

Die Vernetzung zwischen der hyporheischen Zone und dem Wasserkörper ist für die Entwicklung des Makrozoobenthos und den Reproduktionserfolg kieslaichender Fische von fundamentaler Bedeutung. Die Infiltration von Feinsedimenten führt zur Kolmation der Gewässersohle und verringert die Porosität sowie den vertikalen Wasseraustausch. Der natürliche Kolmationszyklus wird durch Verbauungen und Landnutzung beeinträchtigt. Dieses Kapitel vermittelt einen kurzen Überblick über die Abläufe und Einflussfaktoren, die mit einigen Ergebnissen von Experimenten veranschaulicht werden. Die Prinzipien werden anschliessend auf eine Auswahl häufiger Fälle angewandt.

Romain Dubuis, Robin Schroff und Giovanni De Cesare

7.1 Kolmation

In natürlichen geschiebeführenden Fließgewässern beherbergt das poröse Sohlsubstrat eine einzigartige ökologische Vielfalt. Die Sohlsubstratschicht zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser wird als hyporheische Zone bezeichnet (Brunke und Gonser 1997). Sie besteht vorwiegend aus Kies, Steinen und Blöcken. Wie in Abbildung 40 ersichtlich, bildet das Interstitial zwischen den Körnern des Substrats den primären Lebensraum für zahlreiche Organismen. Eine funktionale vertikale Vernetzung ermöglicht den aktiven Austausch zwischen frei fließendem Oberflächenwasser, Porenwasser der hyporheischen Zone

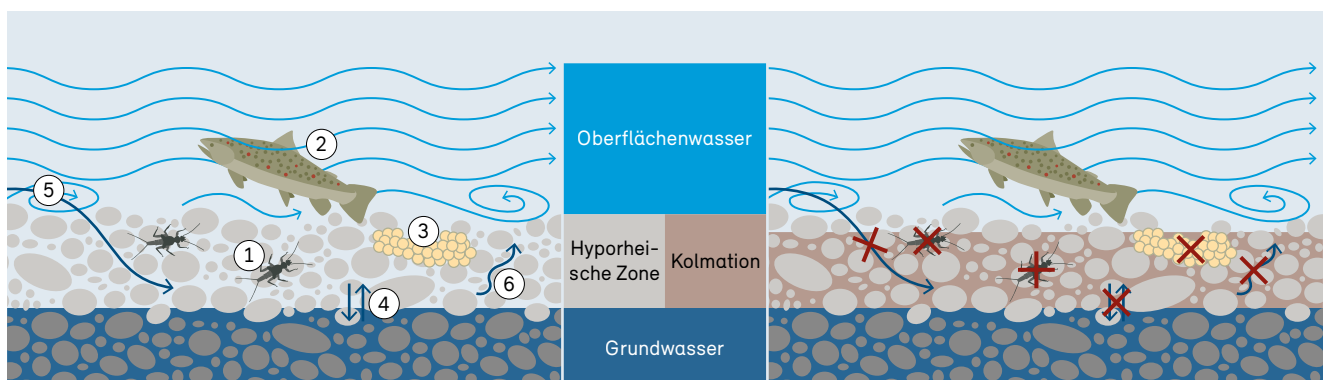
und Grundwasser. Die vertikale Vernetzung fördert die Selbstreinigungskraft des Fließgewässers und trägt zur Regulierung des Grundwasserhaushalts in den Auen bei. Ein ungestörter Austausch von Wasser, Partikeln, Nährstoffen, Sauerstoff und anderen gelösten Verbindungen bildet die Lebensgrundlage der einheimischen Lebensgemeinschaften. Die Eignung der hyporheischen Zone als Habitat wird stark beeinträchtigt, wenn Feinsedimente das Sohlsubstrat kolmatieren. (Bo *et al.* 2007).

7.1.1 Auswirkungen der Kolmation

Als Kolmation wird die schrittweise Verfüllung des Porenraums der Flusssohle mit Feinsedimenten (Wharton *et al.* 2017)

Abbildung 40

Die hyporheische Zone bietet für im Interstitial heimische Organismen, u. a. (1) Makroinvertebraten, einen primären Lebensraum. (2) Kieslaicher vergraben ihre (3) Eier direkt im Substrat, wo sie geeignete Bedingungen vorfinden (Kondolf 2000). Zwischen dem Grundwasser und dem Fließgewässer (4) sowie zwischen der hyporheischen Zone und dem Oberflächenwasser (5, 6) findet ein beständiger Austausch statt. Die durch Kolmation hervorgerufenen Veränderungen in der hyporheischen Zone sind rechts dargestellt.



bezeichnet. Kolmation ist per se ein natürliches Phänomen, das jedoch häufig durch anthropogene Einflüsse verstärkt wird. Eine ausgeprägte Kolmation hat zumeist schädliche ökologische Auswirkungen. Die Veränderung der lokalen Umweltverhältnisse sowie die Störung natürlicher Austauschprozesse führen zur Degradierung des Lebensraums «Gewässersohle», mit unmittelbaren, negativen Auswirkungen auf Makrozoobenthos und Fische (Fig. 40; Pulg *et al.* 2013; Sternecker *et al.* 2013). Makrozoobenthos benötigen Porenräume als Lebensraum und eine raue Gewässersohle zur Verhinderung von Drift. Fische benötigen lockeres Substrat, um ihre Laichplätze anzulegen. Störungen der natürlichen Austauschprozesse entziehen Makrozoobenthos, Fischlaich und Fischlarven Nährstoffe und Sauerstoff und beeinträchtigen den Abtransport von Stoffwechselabfällen während der Brutzeit (Laichentwicklung). Überdies wird die ökologisch wichtige Temperaturregulierung im Substrat

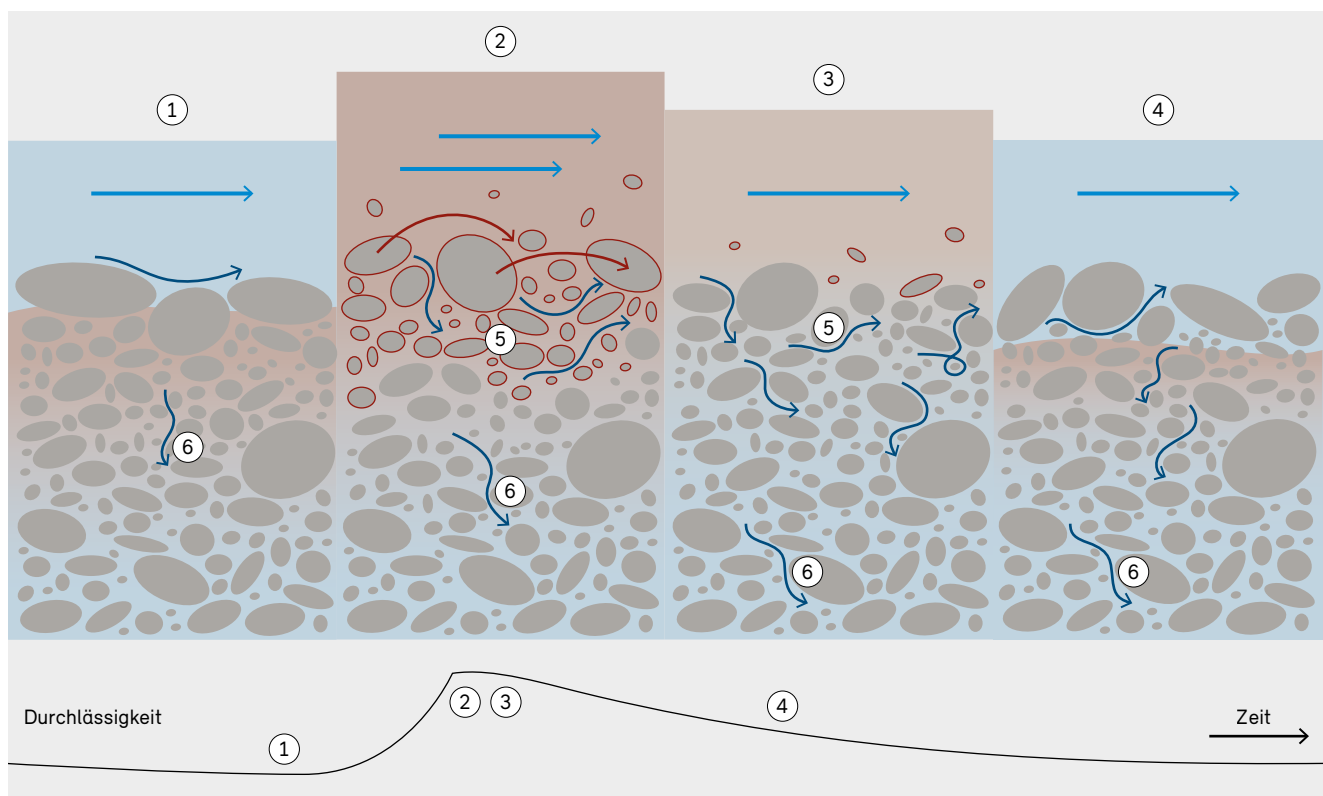
durch die geringe Durchlässigkeit zum meist wärmeren oder kälteren Grundwasser gestört.

7.1.2 Prozessablauf der Kolmation

Bei der Kolmation lassen sich grundsätzlich drei Entstehungsprozesse unterscheiden: physikalische, biologische und chemische Kolmation. Als physikalische Kolmation wird das Eindringen von Schwebstoffen in das Sohlsubstrat und die Bildung einer Schicht mit geringer Durchlässigkeit, niedriger Porosität und oft ausgeprägter Verfestigung bezeichnet. Daraus ergibt sich eine schwache vertikale Vernetzung. Feinmaterial, relativ warmes Wasser und Sonnenlicht sowie das Ausbleiben disruptiver Ereignisse begünstigen die Entwicklung verschiedener Organismen wie Algen, Kieselalgen und Bakterien, die die Poren füllen und das Substrat verfestigen (biologische Kolmation). Eine geringe vertikale Vernetzung und Substratverfestigung

Abbildung 41

Kolmationsvorgang und -zyklus. (1) Kolmatiertes Substrat mit geringer Durchlässigkeit; (2) Hochwasserereignis mit Dekolmation: Die Strömung dringt unter den Kies und setzt Feinpartikel frei; (3) Hochwasserrückgang: Das Substrat weist einen geringen Feinsedimentgehalt auf, die vertikale Vernetzung wird maximiert; (4) Bildung einer neuen Kolmationsschicht; (5) advektives Pumpen; (6) Absinken.



können auch durch chemische Reaktionen gelöster Stoffe entstehen, die nach der Ausfällung Verbindungen eingehen, z. B. bei der Kalkausfällung. Im vorliegenden Kapitel steht die physikalische Kolmation im Vordergrund. Die verstärkende Wirkung der biologischen und chemischen Kolmation sind jedoch bei der Gesamtanalyse des Kolmationsgrads einer Flusssohle nicht zu vernachlässigen.

Bei der Kolmation und Dekolmation handelt es sich um zyklische und natürliche Prozesse. Sie hängen davon ab, wie häufig Hochwasserereignisse die Gewässersohle mobilisieren und die kolmatisierte Schicht teilweise oder ganz aufbrechen. Sobald das Sohlsubstrat in einen stabilen Zustand zurückkehrt, beginnt eine neue Kolmationsphase (Park *et al.* 2019). Der gesamte Zyklus ist in Abbildung 41 dargestellt. Generell werden zwei Arten von physikalischer Kolmation unterschieden. Als äussere Kolmation (Abb. 43a) wird die Ablagerung von Feinsedimenten auf dem Substrat bei niedriger Strömungsgeschwindigkeit und natürlicher Sedimentation bezeichnet (Schälchli, Abegg + Hunzinger, 2001). Innere Kolmation bezeichnet die Bildung einer Feinsedimentschicht in der hyporheischen Zone. Dieser Prozess erfordert eine ausreichend hohe Feinsediment- bzw. Schwebstoffkonzentration, eine Substratmatrix als Träger sowie Infiltrationsvorgänge als Antriebsfaktor.

Die Konzentration von Feinsediment im Oberflächenwasser (Schwebstoffkonzentration) hängt von den hydrogeologischen Bedingungen ab. Bei Hochwasser und dem darauffolgenden Hochwasserrückgang oder in Gletschereinzugsgebieten ist die Konzentration von Feinsedimenten hoch (Abb. 41.2, 41.3). Dies ist auf Bodenerosion und die Freisetzung von in der Gewässersohle eingeschlossenen Feinsedimenten zurückzuführen. Das Substrat wirkt wie ein Filter, der einen Teil der Feinsedimente zurückhält, die in die hyporheische Zone gelangen. Die funktionale vertikale Vernetzung setzt eine hohe Durchlässigkeit voraus. Je mehr Schwebstoffe sich ablagern, desto kleiner werden die Zwischenräume, und nur die feinen Schwebstoffe gelangen in die Substratmatrix (Abb. 41.1, 41.4). Durch diesen Filter fliesst eine geringere schwebstoffhaltige Strömung, sodass die kolmatisierte Schicht schliesslich ein stabiles Niveau erreicht (Abb. 41.1).

Der Filtervorgang wird durch mehrere Mechanismen gesteuert. Durch advektives Pumpen dringt Oberflächenwasser in die hyporheische Zone ein (Abb. 41.5): Dieser Prozess wird durch kleine lokale Druckunterschiede ausgelöst (Fries und Taghon 2010). Der Austausch zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser hat einen erheblichen Einfluss auf den Kolmationsprozess, da er das Eindringen der schwebstoffhaltigen Strömung reguliert (Boano *et al.* 2014; Fox *et al.* 2018). Aufstossen und Absinken (Abb. 41.6) werden durch das Druckgefälle zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser verursacht oder werden durch die Gewässermorphologie bedingt, z. B. bei Furten oder Schwellen.

7.1.3 Einflussfaktoren und Laborexperimente

Die Ablagerung von Feinsedimenten und die Bildung einer Kolmationsschicht hängen von verschiedenen Einflussfaktoren ab, u. a. von dem (i) Korngrössenverhältnis zwischen Schwebstoffen und Gewässersohle, den (ii) Strömungsverhältnissen, dem (iii) Austausch zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser und der (iv) Schwebstoffkonzentration. Diese Faktoren und ihre Wechselwirkungen sind sowohl in naturnahen als auch in beeinträchtigten Fließgewässern zu beobachten.

Im Labor des Forschungsinstituts PL-LCH der EPFL (Abb. 42) wurden in einer Laborrinne Experimente durchgeführt, um den Kolmationsvorgang mit verschiedenen Parametern zu reproduzieren. Ziel der Untersuchungen war es zu analysieren, wie der Infiltrationsgradient und die Strömungsverhältnisse die Durchlässigkeit und die vertikale Verteilung des abgelagerten Materials beeinflussen. Einige Versuchsergebnisse sind in den Abbildungen 43–45 dargestellt.

(i) Als wichtigste Parameter, die bestimmen, wie tief Feinsedimente in die Substratmatrix eindringen können, gelten das Korngrössenverhältnis zwischen Schwebstoffen und Sohlsubstrat sowie dessen Korngrössenverteilung, insbesondere die Standardabweichung der Korngrössenverteilung. Bei grobem, gleichmässigem Substrat ist die Sickerung durch die Matrix stärker, bis eine undurchlässige oder feinere Schicht erreicht ist. In einem Substrat, das grobe und feine Körner enthält, bildet sich wegen der Filterwirkung des Sands eine dünnere Kolmationsschicht. Die Schwebstoffkonzentration im Substrat nimmt in der

Regel exponentiell ab, wobei die maximale Konzentration in der oberflächennahen Kolmationsschicht auftritt, was der Porensättigung entspricht (Abb. 43, 44, Cui *et al.* 2008; Gibson *et al.* 2009). Die feinsten Schwebstoffteile können jedoch in tiefere Schichten der Gewässersohle gelangen.

Grössere Poren begünstigen Advektionsprozesse in der Gewässersohle und bewirken, dass Partikel in Bereiche mit geringer Sohlschubspannung gelangen, wo sie sich leicht ablagern. Experimentell wurde gezeigt, dass in grobem Kies mehr toniges Material abgelagert wird als in sandigem Substrat (Mooneyham und Strom 2018). Grober Kies auf einem feinen Substrat, d. h. eine «Deckschicht», verstärkt die Ablagerung und die Bildung einer Kolmationsschicht unter der obersten Schicht.

(ii) Die Strömungsverhältnisse wirken sich auf die Advektionsprozesse in der hyporheischen Zone und auf die Ablagerungsrate aus. Aufgrund geringerer Druckunterschiede bei vernachlässigbarer Sickerung führt die advektionsdominierte Kolmation im Vergleich zur infiltrationsdominierten Kolmation zu einer geringeren Verfestigung des Sohlsubstrats (Cunningham *et al.* 1987). Langfristig wirken sich die Strömungsverhältnisse auf die Korngrößenverteilung des Substrats aus. Bei niedriger

Fliessgeschwindigkeit und entsprechend geringerer Sohlschubspannung lagern sich wegen der Schwerkraft Feinsedimente ab; eine äussere Kolmation ist so möglich (Abb. 43). Bei hoher Sohlschubspannung befindet sich die oberste Kolmationsschicht unter der Sohlenoberfläche in einer Tiefe, in der kein Aufwirbeln möglich ist. Dies begrenzt die weitere Zunahme der Kolmation, d. h. die Durchlässigkeit erreicht ein Minimum (Schälchli 1993).

(iii) Der Austausch zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser wirkt sich via Infiltration und Exfiltration stark auf die Kolmation aus. Bei Exfiltration (oder Aufstossen) verläuft die mittlere Strömung zur Oberfläche, sodass das Eindringen von Oberflächenwasser und die Ablagerung von Feinpartikeln behindert wird. Je nachdem, wie ungleichmässig die hyporheische Strömung ausfällt, beschränkt sich die Kolmation auf lokale Bereiche. Bei Infiltration (oder Absinken) werden Teile der mit Schwebstoffen beladenen Strömung ins Grundwasser geleitet. Das Sohlsubstrat wirkt dabei als Filter. Der Wasserfluss hängt vom Sickergradienten (abnehmende Wasserdruckhöhe bei bestimmter Entfernung) und von der Durchlässigkeit ab. Ein hoher Sickergradient korreliert normalerweise mit einer tiefen Kolmationsschicht (Schälchli 1993; siehe auch Abb. 44). Aufstossen und Absinken werden von unterschiedlichen Mechanismen auf verschiedenen Skalen gesteuert – von dünenförmigen Flussbetten bis zum regionalen Austausch zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser (Tonina und Buffington 2009).

(iv) Mehrere Studien zeigen, dass eine höhere Schwebstoffkonzentration die Ablagerungsrate steigert und den Kolmationsvorgang beschleunigt (Schälchli 1993; Mooneyham und Strom 2018). Die Menge des abgelagerten Materials und die entsprechende Abnahme der Durchlässigkeit hängen von der Schwebstoffkonzentration ab (Abb. 45). Bei einer langsamen Partikelanreicherung entsteht offensichtlich eine festere und dickere Kolmationsschicht, weil mehr Partikel die Poren füllen können (Fetzer *et al.* 2017).

Abbildung 42

Versuchsanordnung zur Untersuchung der Kolmation des Gewässersohlsubstrats im Labor des Forschungsinstituts PL-LCH der EPFL. Die Laborrinne besteht aus einer 30 cm dicken Kiesschicht. In den Versuchen werden die Richtung und Intensität der Strömung durch den Kies sowie die Strömungsverhältnisse im Oberflächenwasser kontrolliert.



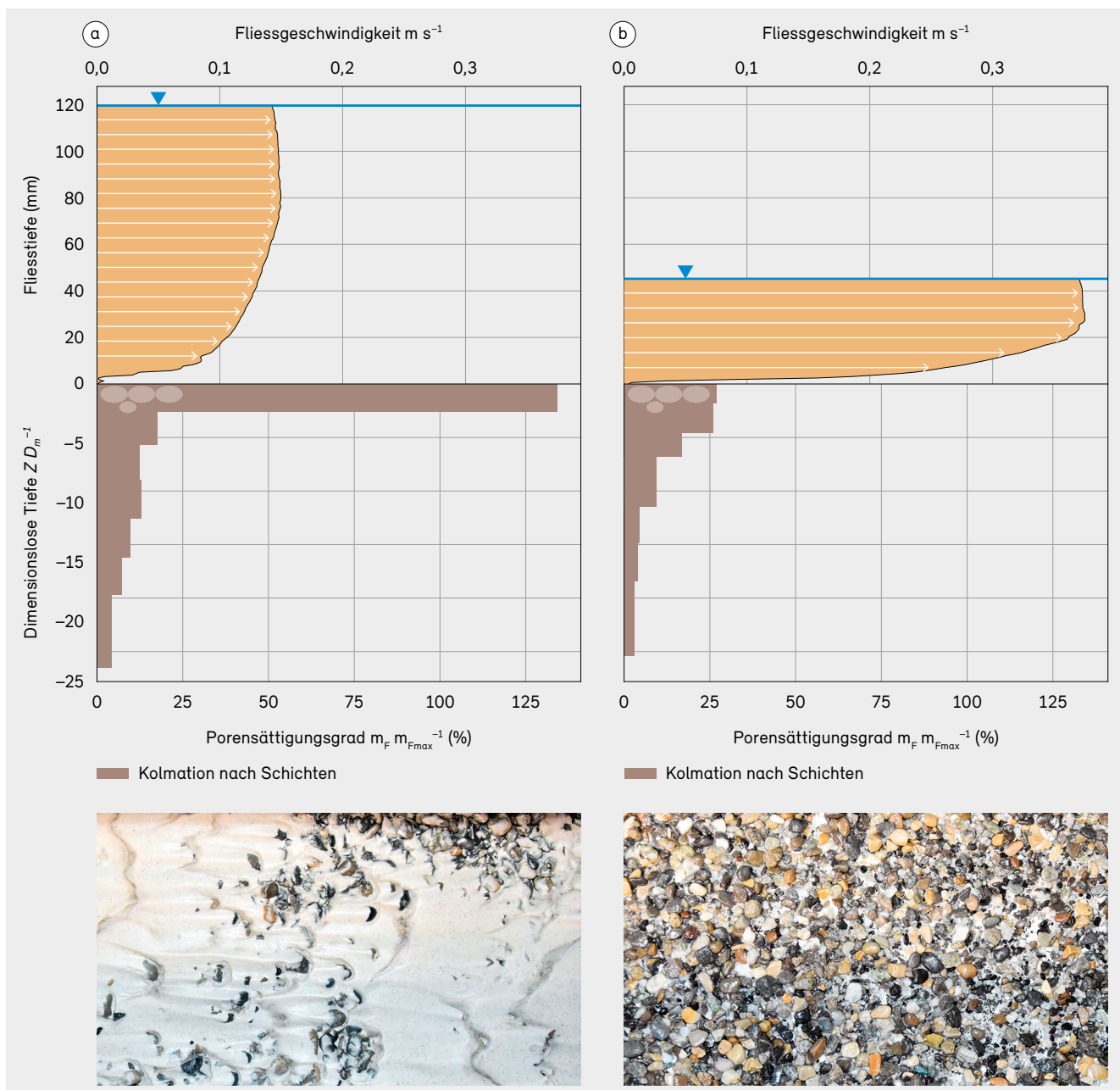
Foto: R. Dubuis

7.1.4 Räumliche Verteilung und Dynamik der Gewässersohle

Die Sohle natürlicher Fliessgewässer ist durch einen mosaikartigen Aufbau lokal unterschiedlicher hydro-morphologischer Bedingungen charakterisiert. Durch die hydro-morphologische Vielfalt kann sich Kolmatierung innerhalb eines Flussabschnitts in verschiedenen Formen

Abbildung 43

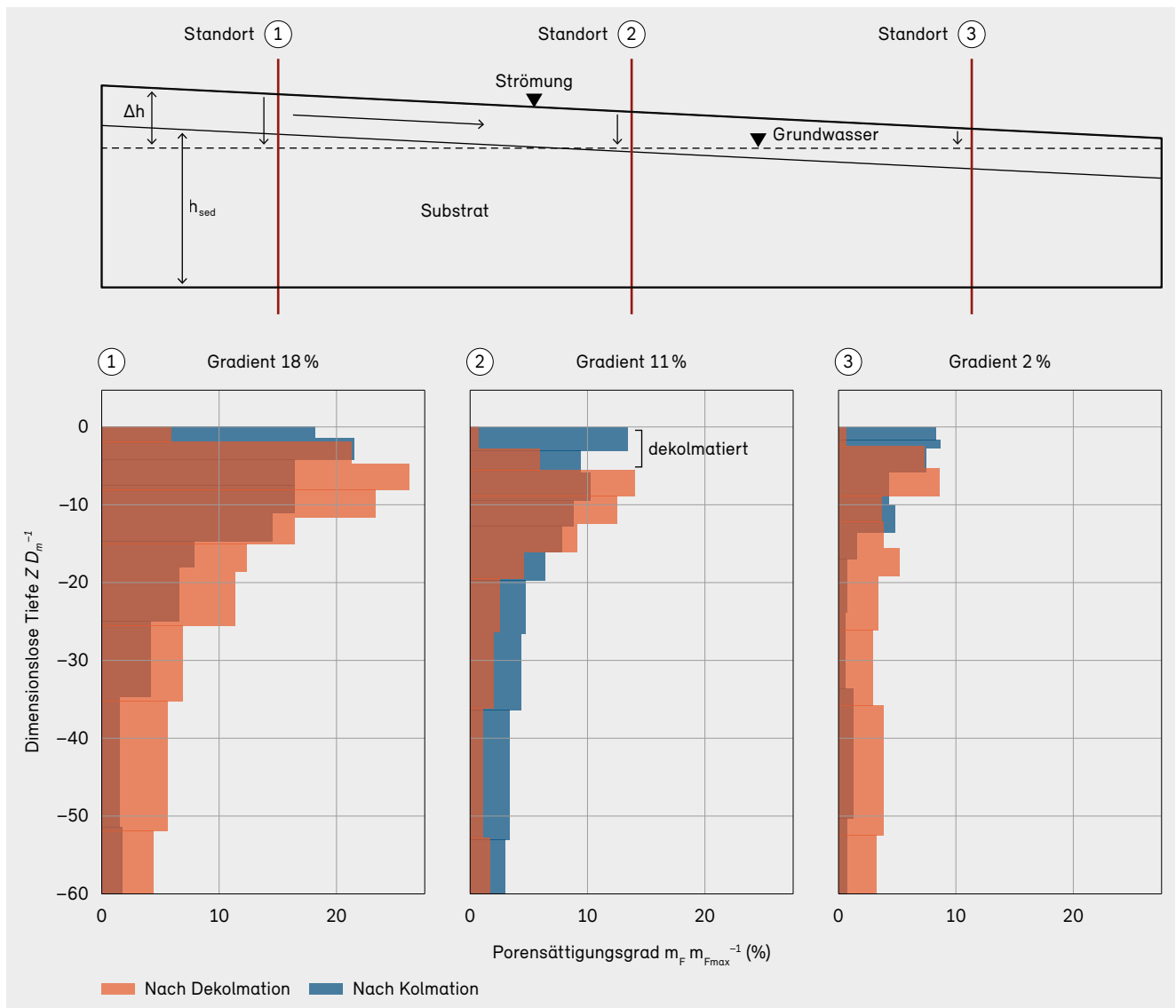
Vergleich zwischen zwei Experimenten des PL-LCH mit gleichem Abfluss, aber unterschiedlichen Gefällen und Fliesstiefen, die zu (a) äusserer Kolmation und (b) innerer Kolmation führen. Die oberen Diagramme zeigen die Fließgeschwindigkeitsprofile, die unteren den entsprechenden Feinsedimentgehalt im Substrat am Versuchsende, ausgedrückt in $m_F m_{Fmax}^{-1}$, d. h. Masse Feinsediment geteilt durch maximale Masse bei Porensättigung; Z = vertikale Tiefe, D_m = mittlerer geometrischer Korndurchmesser. Geringere Fließgeschwindigkeiten und eine entsprechend geringere Sohlschubspannung (a), wie sie häufig in Kolken oder auf Kiesbänken zu beobachten sind, führen zu äusserer Kolmation. Wie das Foto zeigt, ist das Substrat dann grösstenteils von Feinsedimenten bedeckt. Bei höheren Fließgeschwindigkeiten und entsprechend höherer Sohlschubspannung (b) werden Feinsedimente nur unterhalb der Deckschicht abgelagert.



Quelle: EPFL

Abbildung 44

Auswirkung der Dekolmation auf den Porensättigungsgrad an drei Stellen in der Laborrinne des PL-LCH; die entsprechend unterschiedlichen Infiltrationsraten werden durch das steile Gefälle und den horizontalen Grundwasserspiegel bedingt. Der hohe Porensättigungsgrad an Position 1 deutet darauf hin, dass die Kolmation durch den hohen lokalen Sickergradienten verstärkt wird ($\Delta h h_{sed}^{-1}$). An Position 3 gelangen wegen des niedrigeren Sickergradienten weniger Feinsedimente in die Poren; Position 2 stellt eine Übergangssituation dar. An allen drei Standorten erfolgt die Dekolmation nur in der obersten Substratschicht, wo die Porensättigung in einer Tiefe von 1 bis $4 D_m$ (mittlerer geometrischer Substratdurchmesser) abnimmt.



Quelle: EPFL

und Ausprägungen bilden, wobei die Sohlenbreite eine typische Grössenordnung darstellt. Der Kolmationsgrad eines Fließgewässerabschnitts ist räumlich und zeitlich zu untersuchen. Dabei sind auch saisonale Veränderungen von Abfluss und Schwebstoffkonzentration zu berücksichtigen.

Der Kolmationsgrad wird anhand der Durchlässigkeit, der Porosität und der Verfestigung der hyporheischen Zone definiert. Äussere Kolmation findet in Bereichen mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit statt, d. h. in seichtem Wasser auf Kiesbänken und in Ufernähe, möglicherweise auch in Kolken.

Der Sedimenttransport eines Fließgewässers beeinflusst Art und Ausmass der Kolmation. In einigen Fließgewässern werden grosse Mengen an Sedimenten nur bei Hochwasserereignissen transportiert, die die Gewässersohle mobilisieren und eine Dekolmation ermöglichen. Anderswo, z. B. in der kanalisierten Rhone in den Alpen, wird der Transport von Feingeschiebe über die gröbere Flusssohle sogar bei geringer Sohlschubspannung beobachtet. Durch die Geschiebeführung werden weder die Deckschicht zerstört noch eingeschlossene Feinsedimente freigesetzt, weil die Transportkapazität lediglich das feine Geschiebematerial zu bewegen vermag.

7.2 Dekolmation

7.2.1 Wirksamkeit der Dekolmation

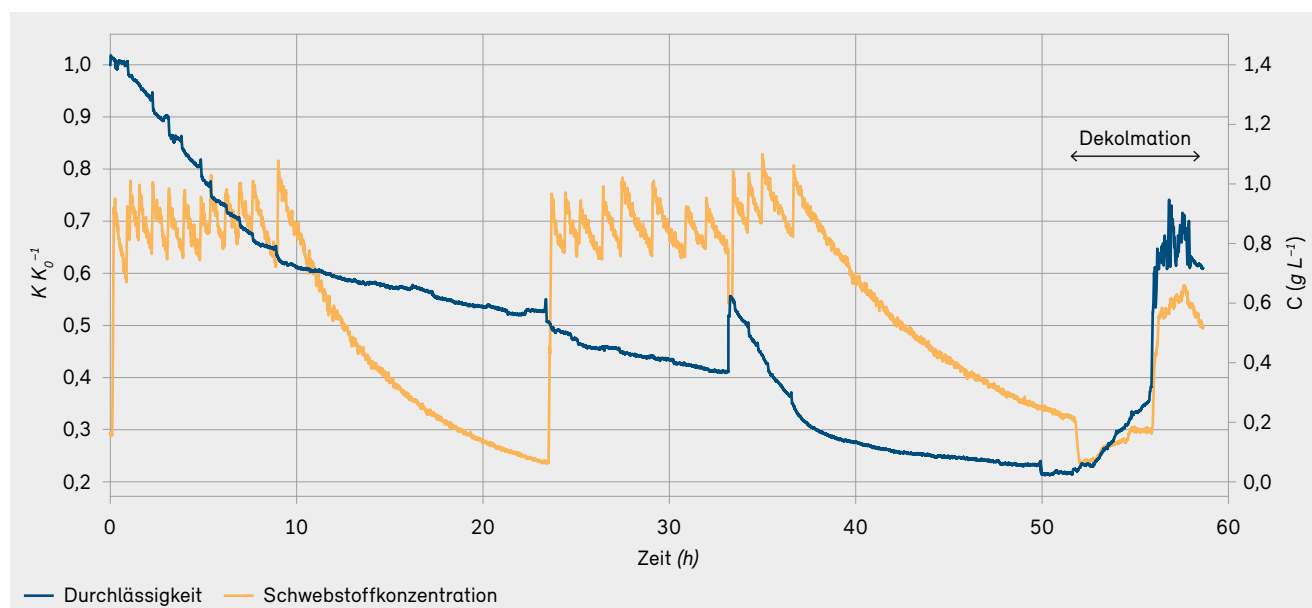
Die Wirksamkeit des Dekolmationsvorgangs hängt von der Dicke der beim Hochwasserereignis mobilisierten Schicht ab. In den Experimenten des Forschungsinstituts PL-LCH wurden bis zu $3 D_m$ (mittlerer geometrischer Korndurchmesser des Substrats) mobilisiert (Abb. 44).

Die Durchlässigkeit nimmt entsprechend zu, wobei bei Einsetzen der Mobilisierung der Gewässersohle ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen ist (Abb. 45). Die oberen Schichten des Substrats sind in der Regel am stärksten kolmatiert, werden jedoch auch am schnellsten wieder dekolmatiert. Eine sichtbare Dekolmation bedeutet nicht, dass alle infiltrierten Feinsedimente in die Strömung freigesetzt wurden.

Gemäss Schälchli (1993) beträgt die dimensionslose Sohlschubspannung zur Initiierung der Dekolmation rund $\theta_K = 0,06$. Die komplette Dekolmation der Gewässersohle wird bei $\theta_D > 0,07$ festgestellt, was einer kräftigen Geschiebeführung entspricht. Die zur Durchspülung einer Gewässerstrecke erforderliche minimale Hochwasserdauer hängt von der Streckenlänge und der Strömungsgeschwindigkeit an der Gewässersohle (Drift-Geschwindigkeit) ab. Der letztere Faktor gibt an, ob die aufgewirbelte Schwebstofffracht über die gesamte Gewässerstrecke transportiert wird, da das Gros der Schwebstoffmasse unter 20 Prozent Strömungstiefe verbleibt. Diese Geschwindigkeit lässt sich anhand typischer logarithmischer Profile abschätzen.

Abbildung 45

Messung der relativen Durchlässigkeit ($K K_0^{-1}$, in Bezug auf den Anfangswert) während eines Kolmations-Dekolmations-Zyklus. $K K_0^{-1}$ nimmt bei hohen Schwebstoffkonzentrationen rascher ab. Der Spitzenwert bei etwa 33 Stunden ist durch die Stichprobenerhebung bedingt. Der Dekolmationsvorgang wird bei einsetzender Mobilisierung des Sohlsubstrats stark beschleunigt.



7.2.2 Folgen der Verfestigung

Kolmation bewirkt eine Verfestigung des Substrats. Dies hat zur Folge, dass es für Fische schwieriger wird, Laichgruben zu schlagen und Makrozoobenthos gelangt schwerer in die hyporheische Zone. Zudem wird die Dekolmation weniger wahrscheinlich. Diese negative Rückkopplung beeinträchtigt die Ausbildung einer natürlichen Verteilung und Ausprägung der Kolmation, welche den Hochwasserzyklen in dynamischer Weise folgen. Die Verfestigung der Gewässersohle lässt sich jedoch durch Bioturbation, d. h. durch das Aufwirbeln von Feinsedimenten, positiv beeinflussen, sodass bessere Laichplätze geschaffen werden (Buxton 2018). Die Förderung geeigneter Habitate für Arten, die zur Bioturbation beitragen, wie z. B. Salmoniden und bestimmte Arten von Makroinvertebraten, könnte künftig die Kolmation verringern.

7.3 Anthropogene Veränderungen und Folgen

Obwohl die Kolmation ein natürlicher Prozess ist, wirken sich Änderungen bei der Landnutzung und an Infrastrukturen stark auf das Abflussregime und den Feststoffhaushalt der Fließgewässer aus. Davon sind vor allem die Schwebstoffkonzentration und die Mobilisierung der Gewässersohle betroffen.

Die Konzentration von Feinsedimenten in Fließgewässern wird durch mehrere Faktoren bestimmt. Wie sie die Kolmation beeinflusst, hängt von Zeitpunkt und Dauer der regelmäßig auftretenden hohen Schwebstoffkonzentrationen ab. So weist z. B. die Rhone, an der zahlreiche Wasserkraftwerke stehen und die von Gletscherschmelzwasser gespiesen wird, ganzjährig eine mittlere bis hohe Konzentration an Feinsedimenten auf. Die Infiltration über einen längeren Zeitraum führt in diesem Beispiel zu einer ausgeprägten inneren Kolmation. Die zyklischen Auswirkungen variabler Strömungsverhältnisse und hoher Schwebstoffkonzentrationen, kombiniert mit Hochwasserereignissen, müssen jedoch noch genauer untersucht werden.

In naturnahen Einzugsgebieten korrelieren mittlere oder hohe Schwebstoffkonzentrationen in der Strömung generell mit Hochwasserereignissen. Der Kolmationsvorgang findet vorwiegend in den darauffolgenden Stunden bzw. Tagen statt. In Fließgewässern mit Rinne-Furt-Schnellen-Sequenzen bewirken die dynamischen Verhältnisse sowie

das lokale Aufstossen und Absinken, dass die Feinsedimente sich unregelmässig verteilen. Mit der Zeit führt die Dynamik des Fließgewässers dazu, dass kolmatisierte Geschiebebänke remobilisiert werden und wieder geeignete Laichplätze entstehen.

Die anthropogenen Veränderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Änderungen bei der Landnutzung, freiliegender Boden, Erosion durch Landwirtschaft und Bautätigkeiten: Höhere Feinsedimenteinträge verstärken die Kolmation. Die verfestigten Schichten sind bei natürlichen Hochwasserereignissen schwerer zu durchbrechen.
- Klimawandel: Der Temperaturanstieg, die Zunahme extremer Niederschlagsereignisse und die beschleunigte Gletscherschmelze haben einen verstärkten Abfluss mit hohen Schwebstoffkonzentrationen zur Folge.
- Fließgewässerkanalisation: Gleichmässige Strömungsverhältnisse gehen mit nur geringfügig gestreuten Korngrößenverteilungen einher. Die Infiltrationsrate variiert entlang eines Fließgewässerabschnitts und bewirkt einen unterschiedlichen Kolmationsgrad. Wenn sich eine Deckschicht gebildet hat, wird die Gewässersohle selten mobilisiert und dann neu gebildet. Der Geschiebetransport bzw. das gelegentliche Durchbrechen der Deckschicht beugt eventuell einer oberflächennahen Kolmationsschicht vor, doch in der Tiefe können sich ausgeprägte Kolmationsschichten bilden.
- Künstliches Abfluss- oder Restwasserregime unterhalb von Stauwerken, Unterbrechungen des Sedimentkontinuums, seltenere Hochwasserereignisse und Mobilisierung von Sedimenten: Die Behinderung des Geschiebetransports führt zu Geschiebedefiziten, zu größerem Sohlsubstrat und zur Erosion der Gewässersohle (Facchini 2017; s. a. Kap. 6). Dabei entsteht eine grobe, selten mobilisierte Deckschicht. Entsprechend wird die Dekolmation verhindert. Wenn Hochwasser ausbleiben, verwandelt sich die Gewässersohle in eine Senke von Feinsedimenten. Diese Auswirkung wird durch biologische und chemische Kolmation weiter verstärkt. Wie in der Saane (FR) zu beobachten ist, hält eine grobe Deckschicht vermehrt Feinsedimente zurück, die sich unterhalb der Decksicht ablagern. Die Restwasserbewirtschaftung begrenzt das Dekolmationspotenzial morphogener Hochwasser.

- Plötzlicher Anstieg der Schwebstoffkonzentration (Stausee-Spülung): An der Oberfläche und in den oberen Schichten der Gewässersohle werden grosse Mengen an Feinsedimenten abgelagert. Die äussere Kolmation tritt in Kolken und in zeitweise benetzten Zonen mit niedriger Sohlschubspannung häufiger auf. Eine anschließende Spülung mit sauberem Wasser trägt dazu bei, die Oberfläche der Gewässersohle zu dekolmatieren. Um aber die in der hyporheischen Zone eingeschlossenen Feinsedimente freizusetzen, ist eine ausreichende Sohlschubspannung erforderlich.
 - Schwall und Sunk: Die durch Hochwasserpulse generierte Sohlschubspannung ist trotz Strömungsschwankungen für eine Dekolmation in der Regel zu schwach. So bildet sich eine gegen den regelmässig wiederkehrenden Abfluss resistente Deckschicht. Gelegentlich wird argumentiert, dass Schwall und Sunk die Kolmation verstärken (Schälchli, Abegg + Hunzinger 2002). Dazu sind jedoch weitere Forschungen erforderlich. Einer aktuellen Studie zufolge (Hauer *et al.* 2019) besteht offensichtlich kein direkter Zusammenhang zwischen der Infiltration von Feinsedimenten und der Intensität der Abflussvariabilität bei Schwall- und Sunkbetrieb. Allerdings werden in solchen Fliessgewässern häufig Unterschiede zwischen dem permanent benetzten Bereich ohne äussere Kolmation und dem vorübergehend benetzten Bereich beobachtet, in dem sich Feinsedimente ansammeln und eine Versiegelung bilden. Dies geht womöglich auf die Erosion und die Ablagerung auf Kiesbänken infolge häufiger Strömungspulse zurück.
- geregelter Strömung in grossen Bereichen eine verstärkte Kolmation und kaum saisonale Dekolmation. Um eine ausreichende vertikale Vernetzung zu gewähren, die den Laicherfolg der Fische und die Lebensraumbedingungen für das Makrozoobenthos verbessert, sollten jährliche Hochwasserereignisse stattfinden, die zumindest eine teilweise Dekolmation auslösen. Die erfolgreiche Dekolmation der hyporheischen Zone hängt weitgehend von Hochwassern ab, die das Substrat mobilisieren und die Deckschicht durchbrechen. Dazu sind mehr naturbelassene Fliessgewässer mit einem natürlicheren Hochwasserregime und natürlicherem Sedimenttransport erforderlich. Die negativen Auswirkungen der biologischen und chemischen Kolmation gilt es insbesondere in Systemen mit relativ warmem Wasser zu berücksichtigen.

7.4 Schlussbemerkung

Die Korngrössenverteilung des Substrats und die Wechselwirkung zwischen Wasserkörper und Grundwasser üben erheblichen Einfluss auf Kolmation und Dekolmation aus, wobei das Aufstossen eine grossflächige Kolmation verhindert. Der natürlicherweise zyklische Kolmations-Dekolmations-Prozess wird durch anthropogene Einflüsse verändert. Hauptfaktoren sind hohe Schwebstoffkonzentrationen sowie Änderungen des Hochwasserregimes und des Sedimenttransports. Anstelle des für naturnahe Systeme typischen unregelmässigen und lokal variierenden Kolmationsgrads zeigen kanalisierte Fliessgewässer mit

Box 10: In der Praxis – Evaluation der Kolmation

Tobias Meile, BG Ingenieure und Berater AG

Ein wichtiges Ziel der Gewässerschutzpolitik des Bundes besteht in der Renaturierung der Fliessgewässer. Dazu gehören die Definition des Gewässerraums, die Umsetzung von Revitalisierungsmassnahmen und die Reduktion der negativen Wirkungen der Wasserkraftnutzung. In diesem Zusammenhang werden in zwei Leitfäden praktische Methoden zur Analyse der inneren und äusseren Kolmation beschrieben (Tonolla *et al.* 2017).

Die Analysemethoden wurden in verschiedenen Fliessgewässern des Alpen- und Voralpenraums angewandt, z. B. Saane, Rhone, Dranse de Ferret, Dranse de Bagnes und Mattervispa. Die praktische und verbreitete Methode von Schälchli, Abegg + Hunzinger (2002) – d. h. die Evaluation des Kolmationsgrads (von «keine Kolmation» bis «vollständige Kolmation») anhand von Vergleichsbildern – beschränkt sich auf den zeitweise benetzten Flussteil. Idealerweise wird die Evaluation bei ausgeprägtem Niedrigwasser und gutem Wetter durchgeführt. Die von Guthruf (2014) entwickelte Methode (Auszugskraft eines Stabs) und die Stiefelmethode

(Kraftaufwand für das Eindringen in das Substrat) (Schälchli, Abegg + Hunzinger 2002; Pulg *et al.* 2013) bieten Alternativen zur Evaluation der Kolmation in benetzten Zonen. In stark strukturierten Bergbächen mit hohem Gefälle (> 1 %) sind sie jedoch nur begrenzt anwendbar. Aufgrund des relativ groben Substrats und der eventuellen Deckschicht besteht das Risiko, dass unabhängig vom tatsächlichen inneren Kolmationsgrad immer die höchste Kolmationskategorie zugewiesen wird.

Um belastbare Ergebnisse zu erzielen, sollten drei bis vier Proben pro Standort entnommen, verschiedene Methoden verglichen und naturbelassene Flussstrecken analysiert werden. Bei der Interpretation sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen: (1) natürliche Kolmation (bei Gletscherwasser häufig), (2) letztes Hochwasser, das die Gewässersohle umgeformt bzw. die Deckschicht durchbrochen hat, (3) besondere Ereignisse wie Murgänge, Erdbeben und Stausee-Spülungen. Dabei ist auf sichere Arbeitsbedingungen im Flussbett und besonders unterhalb von Wasserkraftanlagen zu achten. Eine gründliche Arbeitsplanung bildet den Schlüssel zum Erfolg der Evaluation.