

Einfluss der gewässernahen Landnutzung auf die Funktionalität von Auen und Gewässern

Karl Auerswald

Zusammenfassung

Das Kieslückensystem des Gewässerbodens (Interstitial) ist ein unverzichtbarer Lebensraum für viele Jungformen größerer Gewässerorganismen, das Makrozoobenthos und Biofilme. Gleichzeitig hat es wichtige hydraulische Funktionen wie die Dämpfung von Hochwasserwellen. Durch Auffüllen mit Feinmaterial (Kolmation) büßt das Interstitial seine biologischen und hydraulischen Funktionen jedoch ein. Obwohl das Feinmaterial überwiegend aus der Erosion von Ackerflächen stammt, so ist Erosion doch nicht ursächlich für die Kolmation. Vielmehr ist Kolmation eine Folge der starken hydrologischen Umformung im Anthropozän. Dazu zählt (1) die Förderung des Direktabflusses durch Drainagen und Straßengräben, wodurch weniger Basisabfluss das Interstitial freispült. (2) Gewässernahe Deiche verhindern, dass Erosionsmaterial in der Aue abgelagert werden kann und pressen die feinformaterialbefrachtete Hochwasserwelle ins Interstitial, bis es in der Folge abdichtet. (3) Die verbreitete Absenkung des Grundwassers und die Höherlegung von Flüssen lässt nur kolmatierte Flüsse bestehen, während viele andere Flüsse dadurch verschwunden sind. Auch wenn aus Bodenschutzsicht eine Verminderung der Erosion dringend geboten ist, wird dies die Kolmation der Gewässer daher nicht lindern oder gar beseitigen, solange die hydrologischen Ursachen der Kolmation fortbestehen.

Summary

Influence of land use close to rivers on the functionality of floodplains and river waters

The interstitial pore space of riverbeds is an indispensable habitat for many juveniles of larger aquatic organisms, the macrozoobenthos and biofilms. Simultaneously, it is hydrologically important for buffering floods. Its biological and hydraulic functioning is impeded by intrusion of fines, the so-called colmation. Although the fines found in the interstitial pore space often originate from erosion on arable land, the reason for colmation is not erosion but the massive hydrologic modification of modern landscapes. This includes (i) the promotion of direct runoff on the expense of base flow caused by agricultural drainage and roadside ditches, which restricts the flushing of the interstitial pore space. (ii) Levees close to rivers impede the flooding and alluvial sediment deposition on the valley bottoms but force the sediment-laden water to enter the interstitial pore space until it seals. (iii) The widespread lowering of the groundwater table and the relocation of rivers to topographic higher positions within the valleys allow only colmated rivers to exist while many others have disappeared. Even though soil protection calls for strict erosion control, implementation of erosion control will not avoid or ease colmation until the hydrologic causes of colmation have been removed.

✉ Prof. i. R. Dr. Karl Auerswald, Technische Universität München, School of Life Sciences, Alte Akademie 12, 85354 Freising; auerswald@wzw.tum.de

Einführung

In Deutschland beträgt die jährliche Niederschlagsmenge ca. 859 mm/a. Davon stammen aus der Landverdunstung ca. 532 mm/a (Evapotranspiration), während ca. 327 mm/a aus der Meeresverdunstung stammen und über die Flüsse wieder zurückfließen (BfG 2003). Dieser Rückfluss versickert zunächst größtenteils, speist das Grundwasser, exfiltriert dann in die Gewässer und wird über die Flüsse abgeleitet. Da der Anteil der Oberflächengewässer mit 2,3 % der Fläche relativ gering ist, ergibt dieser Rückfluss eine theoretische, tägliche Exfiltration in die

Oberflächengewässer in Höhe von $39 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, wenn das gesamte Rückflusswasser über den Grundwasserpfad in die Oberflächengewässer gelangt (Abb. 1):

$$\frac{327 \text{ mm/a}}{0,023} = 14217 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) = 39 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$$

Diese Exfiltration ist wichtig für die Funktion des Gewässerbodens. Bei Mittel- und Niedrigwasser spült sie das Sand- und Kieslückensystem (Interstitial) frei und erhält so seine biologischen und hydrologischen Funktionen. Und sie versorgt das Interstitial mit Sauerstoff (Witzel & MacCrimmon 1983, Mull & Wilzbach 2007, Guillemette et al. 2011). Allein durch Diffusion aus der freien Welle ist nicht vorstellbar, wie in 40–50 cm Tiefe lebende Organismen genug Sauerstoff bekommen können. Bei Hochwasser dreht sich dagegen die Fließrichtung bei einem funktionsfähigen Interstitial um, Wasser infiltriert in den Auenbereich und dämpft so die Hochwasserwelle.

Die hydraulische und biologische Funktionsfähigkeit des Interstitials wird beeinträchtigt, wenn die großen Lücken mit Feinmaterial aufgefüllt (kolmatiert) werden (Abb. 2). Die Hochwasserwelle wird nicht mehr gedämpft und das Interstitial steht nicht mehr als Lebensraum für Eier und Larvenstadien von kieslaichenden Fischen (z.B. Bachforelle, Äsche), für Makroinvertebraten (z.B. Stein- und Eintagsfliegen) und für die Entwicklung von Biofilmen zur Verfügung (Geist & Auerswald 2019). Für den in Abb. 2 dargestellten Gewässerausschnitt konnte beispielsweise in dreijährigen Experimenten gezeigt werden, dass nur 30 % der Bachforelleneier schlüpften, während 70 % abstarben (Sternecker et al. 2014). Bei empfindlichen Arten wie der Flussperlmuschel kann Kolmation sogar den Bestand gefährden (Geist & Auerswald 2007).

Die Frage ist nun, welche Einflüsse ursächlich für die Kolmation sind. Als Antwort darauf wird üblicherweise die Ablagerung von Feinmaterial genannt, das auf einen zu hohen Bodenabtrag der Ackerflächen zurückgeführt wird. Bereits Abb. 2 deutet darauf hin, dass dies sehr unwahrscheinlich ist. So ist die Oberfläche des Gewässerbodens frei von Ablagerungen, was auch zeigt, dass vom visuellen Eindruck der Oberfläche nicht auf das Vorliegen einer inneren Kolmation geschlossen werden kann.

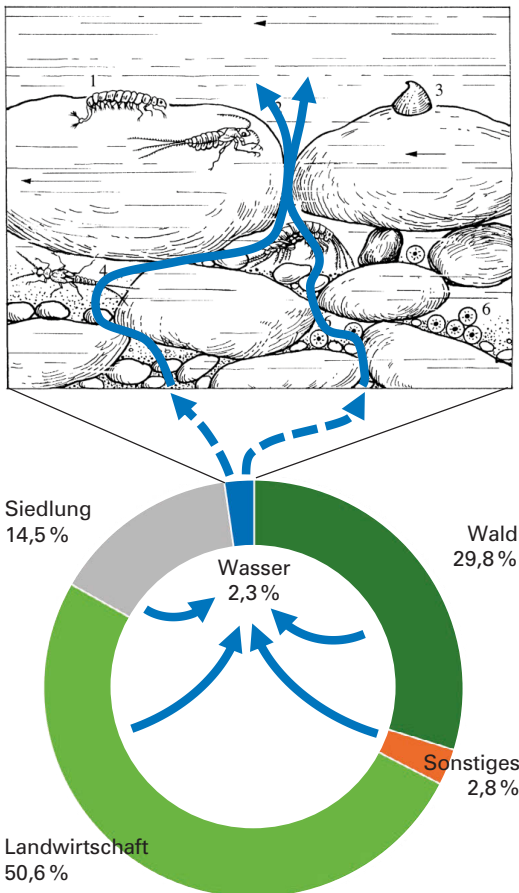


Abb. 1. Landnutzungsverteilung in Deutschland (unten) und theoretischer Wasserfluss über den Grundwasserpfad durch das Interstitial (blaue Linien). – Landnutzungsverteilung nach Statistischem Bundesamt (Stand 31.12.2020); Darstellung des Interstitials nach Patt (2018).

Die nahezu blanke Oberfläche des Gewässerbodens ist in dem Fall darauf zurückzuführen, dass der Standort unmittelbar unterhalb eines Mühlenauslasses liegt, wo die hohe Turbulenz des unter Druck ausströmenden Wassers eine Ablagerung verhindert. Trotzdem ist das Interstitial kolmatiert.

Auch der hohe Gehalt an organischer Substanz, erkennbar an der dunklen Färbung, die in dem Fall nachweislich nicht auf Pyrit zurückzuführen ist (Auerswald & Geist 2018), schließt aus, dass das Feinmaterial durch Sedimentation von Oberbodenmaterial der Ackerflächen in das Interstitial gelangt ist. Zum einen ist der Gehalt an organischer Substanz im Oberboden von Ackerflächen gering (typischerweise um 2–3 %; Amelung et al. 2018), während in dem Gewässer, aus dem die Gefrierkerne in Abb. 2 stammen, das Kolmationsmaterial im Mittel 16 % organische Substanz aufwies (Auerswald & Geist 2018). Zum anderen müsste eine Sedimentation zu einer starken Verarmung an organischer Substanz gegenüber dem durch Erosion eingetragenen Feinmaterial führen, da die Dichtedifferenz von organischer Substanz und Wasser ($1,3 \text{ g/cm}^3 - 1,0 \text{ g/cm}^3 = 0,3 \text{ g/cm}^3$) nur ein Sechstel der Dichtedifferenz der mineralischen Komponente im Erosionsmaterial ist ($2,7 \text{ g/cm}^3 - 1,0 \text{ g/cm}^3 = 1,7 \text{ g/cm}^3$) (spezifische Dichten nach Rühlmann et al. 2006). Das Kolmationsmaterial kann also keinesfalls durch Sedimentation aus der Wassersäule ins Interstitial gelangt sein, auch wenn der überwiegende Teil des in Gewässern transportierten Feinmaterials aus dem Erosionseintrag stammt. Die Sedimentation von Erosionsmaterial der Ackerflächen kann als wesentliche Ursache der Kolmation immer ausgeschlossen werden, wenn der Gehalt an organischer Substanz im Kolmationsmaterial über 0,5 % liegt. Dann müssen andere Quellen und andere Prozesse zumindest wesentlich beitragen.

Selbst die z.T. mächtigen Feinmaterialablagerungen auf den Gewässerböden sind nicht auf einen übermäßigen Erosionseintrag zurückzuführen, sondern auf die flächendeckende Gewässerfragmentierung und Stauhaltung (Nielsson et al. 2005, Vörösmarty et al. 2010), durch die die Transportkapazität der Flüsse stark abnimmt. Daher gelten in der gesamten nördlichen Hemisphäre Flüsse heute sogar als sedimentuntersättigt mit negativen Folgen u. a.



Abb. 2. Oberfläche des Gewässerbodens (a) mit kolmatiertem Kieslückensystem (Gefrierkerne, b, c). – Fotos: © J. Geist.

für die Stabilität von Ufern und Brücken und die Ökologie von Flussdeltas (Dethier et al. 2022, Zarfl & Dunn 2022).

Während der Befund in Abb. 2 als lokale Besonderheit gesehen werden mag, wird im Folgenden gezeigt, warum es unwahrscheinlich ist, dass der erosionsbürtige Feinmaterialeintrag Ursache der (inneren) Kolmation ist und welche Ursachen stattdessen dafür verantwortlich sind.

Eintrag von Feinsediment und Kolmation

Kolmation wird erst seit Mitte des letzten Jahrhunderts in großem Umfang beklagt und Erosion von Ackerflächen als wesentliche Ursache vermutet. Es stellt sich die Frage, ob es seitdem tatsächlich zu Änderungen der Erosionsprozesse gekommen ist, die den Befund der Kolmation erklären können.

(1) Sehr wenig Material reicht zur Kolmation

Für die Kolmation des Interstitialraums ist nur eine sehr geringe Menge an Material nötig. Um 30 cm Gewässerboden mit einem Porenraum von 30 % (wie es z. B. in einem Kiesbett typischerwei-

se der Fall ist) zu kolmatieren, werden etwa 9 cm Feinmaterial benötigt, dies entspricht etwa 45 kg/m². Bei einem durchschnittlichen Wasserflächenanteil von 2,3 % (s. o.) ergibt sich ein Abtrag von

$$45 \text{ kg/m}^2 \cdot 0,023 \approx 1,0 \text{ kg/m}^2 = 10 \text{ t/ha}$$

Die Erosion im Mittel aller Landnutzungen in Deutschland beträgt etwa 3 t/(ha · a) (Auerswald et al. 2009). Daher wäre nach etwa drei Jahren bereits genügend Material eingetragen, um das Interstitial flächendeckend bis 30 cm Tiefe zu füllen. Selbst bei Senkung des Abtrags auf ein Zehntel, was landwirtschaftlich kaum möglich ist (siehe unten), wäre nach 3 Jahren ausreichend Material für eine vollständige Kolmation vorhanden.

(2) Auch unter natürlichen Bedingungen tritt eine hohe Erosion auf

Bei den Erosionsraten wird unterschieden zwischen einer geologischen Erosion, die unvermeidbar ist und im Zuge des Kreislaufs der Gesteine stattfindet (Erosion, Sedimentation und Diagenese der Gesteine), und einer anthropogenen Erosion, die z. B. durch die landwirtschaftliche Nutzung gefördert wird. Die geologische Erosion liegt im Durchschnitt im Bereich von etwa 0,5 t/(ha · a) (Montgomery 2007). Es reichen also bereits 20 Jahre an geologischer Erosion, um genug Material für die Kolmation zu haben (vgl. Argument 1). Flüsse müssten daher schon seit Jahrmillionen und überall kolmatiert sein, allein durch die natürlicherweise stattfindende geologische Erosion.

Hinzu kommt, dass im Gebirgsraum auch unter natürlichen Bedingungen der Abtrag in ähnlicher Größenordnung liegt, wie die Erosion von Ackerflächen (Montgomery 2007). Wäre der Feinmaterialeintrag ursächlich für die Kolmation,

müssten naturnahe alpine Flüsse daher von Natur aus alle kolmatiert sein.

(3) Über Jahrhunderte war der Abtrag höher

Ein weiteres Argument gegen eine ursächliche Wirkung des Erosionseintrags ist, dass über Jahrhunderte der Abtrag höher als heute war (Tab. 1). Hans-Rudolf Bork hat in seiner Habilitationsschrift die Abtragsraten für länger zurückliegende Zeiträume rekonstruiert (Bork 1988). In Tab. 1 sind sie für den Zeitraum 1980–2000 um die auf Abtragsmessungen beruhenden Daten von Cerdan et al. (2010) und Auerswald et al. (2009) ergänzt [der Unterschied im mittleren Abtrag der beiden Literaturquellen beruht im Wesentlichen darauf, dass Cerdan et al. (2010) die hocherosiven Hopfengärten nicht berücksichtigt hatten, da sie nur in Bayern eine flächenmäßig größere Rolle spielen]. Auch wenn wir davon ausgehen können, dass sich die Zahlen des letzten Zeitraums (1980–2000) inzwischen allein durch den Klimawandel bereits verdoppelt haben (Auerswald et al. 2019a), so liegen die Zahlen in den letzten 50 Jahren doch deutlich niedriger als im gesamten letzten Jahrtausend. Dies ist u. a. eine Folge der heute sehr viel dichteren, schneller wachsenden Pflanzenbestände durch Einführung der mineralischen Düngung. Der Abtrag unter Wäldern war wegen des Streureichens und der großen Fallhöhe des Abtropfs in der gleichen Größenordnung wie der von Ackerflächen. Gleiches galt für das als Allmende (über)genutzte Grünland (zur Kulturgeschichte der Landnutzung siehe Poschold 2016). Auch aus historischer Sicht müssten also alle Flüsse schon das gesamte letzte Jahrtausend, wenn nicht sogar seit der Erfindung des Ackerbaus in der Jungsteinzeit kolmatiert sein, wenn der Erosionseintrag tatsächlich eine so große, ursächliche Bedeutung hat.

Tab. 1. Mittlerer Bodenabtrag (t/ha · a) verschiedener Zeitperioden.

Periode	Mittlerer Abtrag	Quelle
940–1340	10	Bork 1988
1340–1350	2250	Bork 1988
1350–1750	25	Bork 1988
1750–1800	160	Bork 1988
1800–1980	20	Bork 1988
1980–2000	2	Cerdan et al. 2010
	3	Auerswald et al. 2009

Ursachen der Kolmation

Da Änderungen des Eintrags von Erosionsmaterial die neuzeitlich beobachtete Kolmation nicht erklären, müssen andere Ursachen verantwortlich sein:

(1) Das Flussbett wurde verengt und die Aue anderweitig genutzt

Die Isar bei München war früher einmal 1000 m breit, heute ist sie eingeeengt auf weniger als 45 m. D. h., der Interstitialraum war früher 22-mal

größer als der heutige und die benötigte Zeit, um ihn aufzufüllen, ist heute entsprechend kürzer. Ähnliches findet sich bei allen großen Flüssen.

Aber nicht nur das eigentliche Flussbett wurde verengt, sondern auch die Aue wird heute anders genutzt und steht als Überflutungs- und Retentionsraum nicht mehr zur Verfügung. Beispielsweise ist die Amperaue bei Zolling eigentlich 2 km breit, der Fluss wurde aber auf 40 m eingeengt (Faktor 50). Bei der Vilsaue bei Vilsbiburg beträgt der Faktor sogar 200: Die Aue ist 1 km breit, der Fluss wurde auf 5 m eingeengt. Hier kommt hinzu, dass eine Feinsedimentauflagerung in der Aue im Grunde nach oben unbegrenzt ist im Gegensatz zum begrenzten Porenraum des Interstitials. Die Auen waren daher früher Räume, in denen gewaltige Mengen an Feinmaterial deponiert werden konnten.

Bei den größeren Flüssen wurde das Flussbett im Rahmen der durch von Tulla am Rhein begonnenen »Fluss-Correctionen« verengt (Mauch & Zeller 2008). Dadurch wurde erreicht, dass sich die Flüsse einschneiden und damit nicht mehr über die Ufer treten können. Dieser Prozess der Eintiefung schreitet inzwischen seit 200 Jahren fort. Dies lässt sich gut am Beispiel des Lechs illustrieren (Auerswald et al. 2019b): Durch das wasserbaulich erzwungene Einschneiden hat der Lech inzwischen die quartären, grundwasserleitenden Schichten (Aquifer) weitgehend durchschnitten und sich fast bis zur Aquifuge eingetieft (Abb. 3). In der Folge ist das Grundwasser, das ursprünglich nahe der Geländeoberfläche war, um den gleichen Betrag abgesunken. Früher gab es durch das hoch anstehende Grundwasser moorige Böden und viele Gewässer. Beides ist durch die Grundwasserabsenkung aber inzwischen verschwunden. Da Grünland aus physiologischen Gründen eine hohe, mit dem Ackerbau konkurrenzfähige Produktivität nur bei hoch anstehendem Grundwasser oder häufigen Niederschlägen hat (Auerswald & Schnyder 2009), musste sich dadurch auch die Landnutzung ändern. Flurkarten vom Lech aus den Jahren 1890 und 2015 zeigen (Abb. 4), dass sowohl das Grünland als auch die Auwälder durch Ackerflächen, aber auch durch Siedlungen ersetzt wurden. Grünland und Auwälder sind heute nahezu vollständig verschwunden. Aus dem ehemaligen Retentionsraum wurde durch die Grundwasserabsenkung ein Liefergebiet für Feinsediment.

Eigentlich wäre zu erwarten, dass alle kleineren Flüsse der Lechaue oder in anderen ähnlichen Situationen durch die Grundwasserabsenkung verschwunden sein müssten. Für viele Bäche und Flüsse gilt dies (Auerswald et al. 2019b), aber die Friedberger Ach existiert trotz der hochdurchlässigen, quartären Schotter weiterhin in der Lechaue. Dies ist nur durch Kolmation möglich, die das Gewässerbett gegenüber dem Untergrund abdichtet und aus der Friedberger Ach einen »schwebenden Fluss« macht. Würde die Kolmation beseitigt, würde der Fluss in die quartären Schotter abtauchen und von der Oberfläche verschwinden.

(2) Höherlegung verhindert ein Freispülen durch den Grundwasserzustrom

Derartige schwebende Flüsse, sowohl große als auch kleine, sind überall zu finden. Sehr häufig wurden – auch ohne Grundwasserabsenkung – Flüsse an den Talrand und damit höhergelegt, um z.B. eine Mühle zu betreiben oder um die Bewirtschaftung des Talgrundes zu erleichtern. Als Beispiel hierfür soll die Moosach und der Mühlangergraben in Freising dienen, deren Verlauf in Gänze künstlich ist und über die Jahrhunderte mehrfach verändert wurde. Heute liegt die Moosach unmittelbar am Fuß des Weihenstephaner Berges; etwas südlich davon verläuft eine Ausleitung, der sogenannte Mühlangergraben (Abb. 5). Beide Flussarme liegen deutlich über dem Gelände und können in dieser Position nur deshalb Wasser führen, weil sie kolmatiert sind. Wären sie nicht kolmatiert und würden mit dem Grundwasser kommunizieren, müsste entweder das Grundwasser wesentlich höher liegen und das angrenzende Siedlungsgebiet überfluten oder das Flussbett trocken sein. Selbst wenn der tiefer eingeschnittene Mühlangergraben noch bis ins Grundwasser reicht, kann er keine Verbindung zum Grundwasser haben. Er muss abgedichtet sein, da sonst das Grundwasser mindestens bis zur Höhe des jeweiligen Wasserspiegels stehen müsste.

Wenn keine hydraulische Verbindung zum Grundwasser besteht, bedeutet dies aber auch, dass Moosach und Mühlangergraben nicht durch Exfiltration vom Grundwasser gespeist werden können. Der wesentliche Mechanismus zur Freispülung und zur Sauerstoffversorgung des Interstitials entfällt somit.

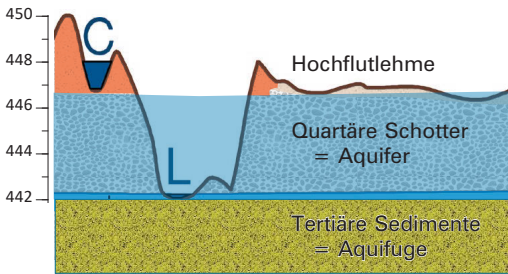


Abb. 3. Topografischer Schnitt durch die Lechaue in Höhe von Gersthofen, mit Lech (L) und Lechkanal (C). Die Grundwasseroberfläche wurde von knapp 447 m auf mittlerweile 442 m abgesenkt. Braun gefärbt: technogene Substrate; kräftig blau: jetziger Grundwasserstand; durchscheinend blau: ursprünglicher Grundwasserstand vor den Lech-Correctionen. – Topographie aus *BayernAtlas-plus*, Bayerisches Landesamt für Vermessung; Fluss- und Grundwasserspiegel vom Niedrigwasser-Informationssdienst, www.nid.bayern.de.

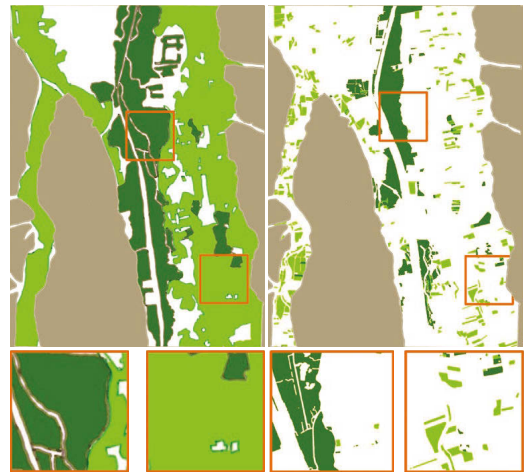


Abb. 4. Nutzung der Aue an Lech und Schmutter 1890 (links) und 2015 (rechts). Dunkelgrün: Auwälder; hellgrün: Grünland; unten: vergrößerte Darstellung der beiden Quadrate, die in beiden Jahren identisch liegen. – Auerswald et al. 2019b, verändert.

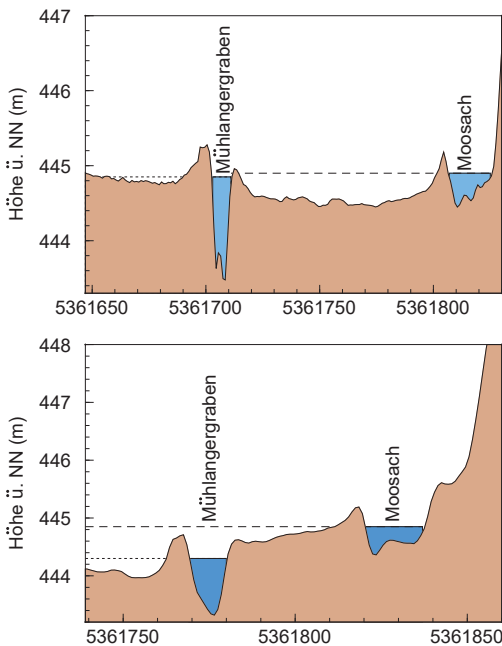


Abb. 5. Zwei Schnitte durch Moosach und Mühlangergraben am südlichen Fuße des Weihenstephaner Berges, Freising, dessen Anstieg jeweils am rechten Bildrand zu sehen ist. Horizontale, gestrichelte Linien: Höhe, auf der das Grundwasser stehen müsste, wenn Moosach und Mühlangergraben nicht durch Kolmatierung gegenüber dem Untergrund abgedichtet wären; Zahlen auf der x-Achse: Gauss-Krüger-Hochwerte; Rechtswerte: 4479 926,5 (oben), 4480 180,5 (unten).

(3) Künstliche Längsdämme verhindern die Überflutung der Aue und kolmatieren den Gewässergrund

Um die Flüsse in ihren künstlich geschaffenen Positionen zu halten, werden üblicherweise Dämme gebaut. Bei einem Hochwasserereignis mit Feinsediment erhöht sich der hydraulische Gradient durch den jetzt zusätzlich wassergefüllten Bereich zwischen den Dämmen (Abb. 6b), wodurch das mit Feinsediment beladene (Hoch-) Wasser in das Interstitial gedrückt wird, bis dieses kolmatiert und abgedichtet ist. Der Bau von Dämmen erzwingt quasi die Kolmatierung des Gewässerbodens.

Bei naturnahen Flüssen entstehen durch die Überflutung der Aue ebenfalls Uferwälle, die sogenannten Ränen. Diese Ränen werden allerdings bei Hochwasser überströmt. Dadurch werden die Ränen erhöht oder neu gebildet, wenn sie aus irgendeinem Grund nicht mehr vorhanden oder gestört sind. Wenn der Wasserstand im Fluss zurückgeht, verhindert daher die Räne ein Zurückströmen des feinsedimenthaltigen Wassers. Die Aue bleibt überflutet (Abb. 6a). Das Feinsediment hat ausreichend Zeit sich abzulagern, und sei es durch Eintrocknen. Das in der Aue »gefangene« Wasser wird aufgrund des erhöhten hydraulischen Gradienten über den

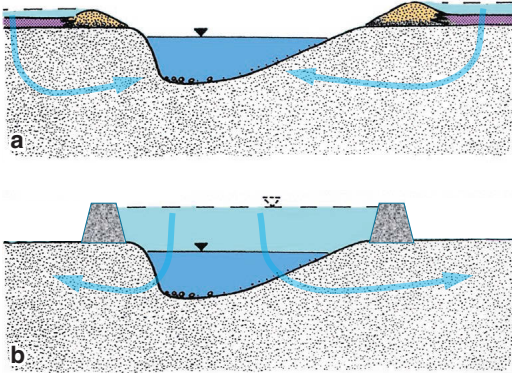


Abb. 6. Hydraulische Verhältnisse kurz nach dem Scheitel der Hochwasserwelle; **a:** Fluss mit natürlichen Uferwällen, **b:** Fluss mit Hochwasserdämmen. Pfeile: Bewegungsrichtung des Wassers aufgrund des hydraulischen Gradienten; hellbraun: Uferwall; dunkelgrau: Damm, lila: abgelagertes Feinmaterial. – Auerswald et al. 2019b.

Grundwasserpfad in das Gewässer hineindrückt und spült das Interstitial frei. Dies geschieht schon unmittelbar nach dem Erosionsereignis, so dass evtl. durch das Hochwasserereignis in das Flussbett eingedrungenes Material relativ schnell wieder aus dem Interstitial herausgespült und abtransportiert wird, noch bevor Verfestigungsprozesse einsetzen können.

(4) Die Wasserflüsse wurden verändert

Wenn das Grundwasser nicht mehr durch Exfiltration ins Gewässer gelangt, weil der Grundwasserspiegel zu tief liegt und das Gewässer durch Kolmation abgedichtet ist, stellt sich die Frage, wie das Wasser, das zurück ins Meer fließen muss, überhaupt in die Flüsse gelangt. Prinzipiell wird zwischen dem nach einem größeren Regenerereignis schnell einsetzenden Hochwasserabfluss (»Direktabfluss«, bestehend aus Oberflächenabfluss und schnellem Zwischenabfluss) und dem Trockenwetterabfluss (»Basisabfluss«, bestehend aus langsamem Zwischenabfluss und grundwasserbürtigem Abfluss) unterschieden. Dabei gelangt der Basisabfluss durch Exfiltration ins Gewässer, während der Direktabfluss größtenteils direkt zufließt. In einem naturnahen System sollte der Basisabfluss 85–90 % betragen. Gemäß hydrologischem Atlas von Deutschland (BfG 2003) macht der Basisabfluss in Deutschland jedoch nur

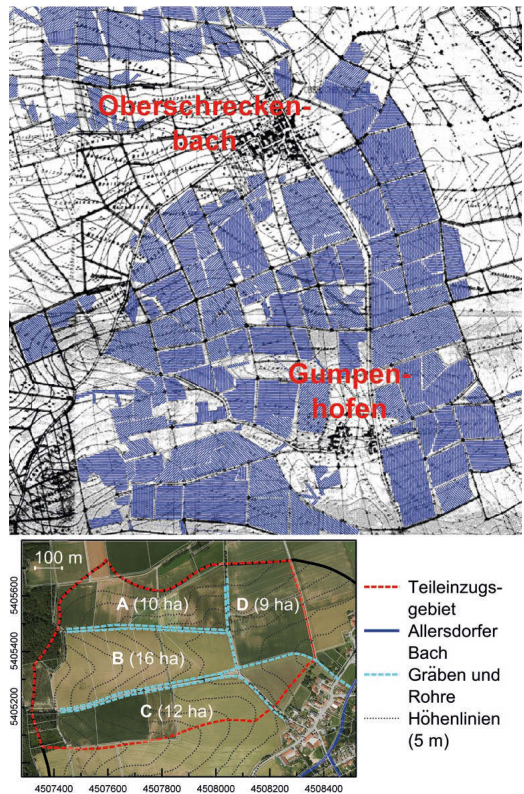


Abb. 7. Künstliche Entwässerung moderner Landschaften durch landwirtschaftliche Drainagen und Straßengräben. **Oben:** Drainageplan der Ortschaft Gumpenhofen nahe Rothenburg ob der Tauber (nachgezeichnet nach alten Drainageplänen, um 1975; mittlerer Jahresniederschlag: 640 mm/a); **unten:** Straßengräben in einem Teileinzugsgebiet der Ortschaft Birnbach (Gemeinde Schierling) am Allersdorfer Bach. Achsenbeschriftungen: Gauss-Krüger-Koordinaten. – Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung; Seibert & Auerswald 2020.

noch 41 % des Abflusses aus. Statt der eingangs genannten, rechnerisch 327 mm/a, die über Flüsse zurück ins Meer fließen, durchströmen den Gewässerboden daher nur 135 mm/a. Dabei ist bereits dies eine deutliche Überschätzung, da diese Abschätzung zum einen auf Zeitreihen und Messungen in der Vergangenheit beruht und daher nicht die aktuelle Situation widerspiegelt. Heute liegt der Direktabfluss vermutlich bereits deutlich über 60 %, da die unten beschriebenen Veränderungen fortschreiten, die zu einer Verschiebung der Abflüsse in Richtung Direktabfluss führen. Zum anderen enthält der Basisabfluss

auch den Klarwasserabfluss der Kläranlagen, der ebenfalls kontinuierlich fließt und damit in der Abflusskomponentenseparierung nicht von dem Basisabfluss zu unterscheiden ist. Nach Drewes et al. (2018) macht Klarwasser in Deutschland etwa 5 % des mittleren Abflusses aus, wodurch sich die Wassermenge, die den Gewässerboden durchströmt, weiter reduziert auf etwa 120 mm/a. Wichtiger als dieser Durchschnittswert ist, dass der Klarwasseranteil in niederschlagsarmen Gebieten und in niederschlagsarmen Zeiten auch 50 % des Abflusses ausmachen kann. Dies bedeutet, dass unter solchen Bedingungen in großen Teilen eines Flusses überhaupt keine Durchströmung des Interstitials mehr stattfindet.

Einer der Gründe für den geringen Basisabfluss ist die Drainage der land- und forstwirtschaftlichen Flächen. Diese fördert den schnellen Zwischenabfluss stark. In der Vergangenheit wurden Drainagen selbst in Gebieten, die zu den trockensten in Bayern gehören, massiv vom Staat gefördert, wie aus Drainageplänen hervorgeht (Abb. 7 oben). In diesen von einem dichten Netz von Drainagegräben durchzogenen Gebieten ist eine Grundwasserneubildung fast unmöglich, da das Wasser vorher schon in der Drainage landet.

Weiterhin wurde der Oberflächenabfluss sehr stark gefördert, indem die Landschaft insbesondere über die vielen Wege und Straßen und die dadurch notwendigen Weg- und Straßenseitengräben sehr effizient entwässert wird. Als Beispiel sei der Ort Birnbach südlich von Regensburg gezeigt (Abb. 7 unten). Der Oberflächenabfluss aus den angrenzenden Feldern landet nach maximal 100 m in einem der zahlreichen Wegseitengräben und von dort sehr schnell in Birnbach. Es gibt auf der Fläche keine Retention des Oberflächenabflusses mehr und damit auch keine Chance, dass der Oberflächenabfluss versickern kann. Stattdessen wird er rasch aus der Landschaft hinaus in den Allersdorfer Bach geleitet. Dort kann er einerseits Überflutungen des Ortes Birnbach auslösen, andererseits steht damit das Wasser für die Durchspülung des Interstitials nicht mehr zur Verfügung.

Fazit

Die hydraulische und die biotische Funktionalität von Auen und Fließgewässern erfordert reversible Wasserflüsse durchs Interstitial; diese Wasserflüsse sind durch Kolmation gestört. Die Gründe hierfür liegen vor allem in einer Veränderung der Wasserflüsse, nicht im veränderten Sedimenteintrag:

- Die Auen sind als Retentionsraum verlorengegangen.
- Künstliche Dämme erzwingen eine Kolmation.
- Höherlegung der Flüsse und Tieferlegung des Grundwassers haben schwebende Flüsse erzeugt.
- Die umfassende Entwässerung der Landschaft durch Land- und Forstwirtschaft, Siedlung und Verkehr haben den Basisabfluss, der das Interstitial durchspült, zugunsten des Direktabflusses vermindert.

Dieser Prozess der Landschaftsumformung geht unablässig weiter. Jeder Tag, an dem ein neues Gebäude gebaut wird, verschiebt den Abfluss in Richtung Direktabfluss zu Lasten des Basisabflusses.

Strukturreiche, den vielfältigen Lebensformen ein Habitat bietende Unterwasserböden erfordern darüber hinaus eine hohe Sinuosität des Flusslaufs, d.h. ein starkes Mäandrieren, und das Vorhandensein einzelner submers lebender Makrophyten (Braun et al. 2012).

Danksagung

Der Weg zur Erkenntnis, dass Erosion nicht ursächlich für Kolmation ist, war lang und wäre erfolglos geblieben ohne die mittlerweile zwei Jahrzehnte dauernde, befruchtende Diskussion zur Ökologie der Fließgewässerböden mit Jürgen Geist.

Literatur

- Amelung, W., H.-P. Blume, H. Fleige, R. Horn, E. Kandeler, I. Kögel-Knabner, R. Kretschmar, K. Stahr & B.-M. Wilke. 2018. Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. – Springer Spektrum Berlin, Heidelberg, 750 S., <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-55871-3> [abgerufen am 26.07.2022].
- Auerswald, K. & J. Geist. 2018. Extent and causes of siltation in a headwater stream bed: catchment soil erosion is less important than internal stream

- processes. – Land Degradation and Development, 29(3): 737–748. <https://doi.org/10.1002/ldr.2779>.
- Auerswald, K. & H. Schnyder. 2009. Böden als Grünlandstandorte. Kap. 4.2.3. – In: Blume, H.-P., P. Felix-Henningsen, W. R. Fischer, H.-G. Frede, R. Horn & K. Stahr (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Wiley-VCH, Weinheim, 15 S.
- Auerswald, K., P. Fiener & R. Dikau. 2009. Rates of sheet and rill erosion in Germany – A meta-analysis. – Geomorphology, 111(3–4): 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.04.018>.
- Auerswald, K., F. Fischer, T. Winterrath & R. Brandhuber. 2019a. Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. – Hydrology and Earth System Sciences, 23(4): 1819–1832. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019>.
- Auerswald, K., P. Moyle, S. P. Seibert & J. Geist. 2019b. HESS Opinions: Socio-economic and ecological trade-offs of flood management – benefits of a transdisciplinary approach. – Hydrology and Earth System Sciences, 23(2): 1035–1044. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1035-2019>.
- Bork, H.-R. 1988. Bodenerosion und Umwelt – Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion: Bodenerosionsprozesse, Modelle und Simulationen. – Landschaftsgenese Landschaftsökologie, 13: 249 S.
- BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde). 2003. Hydrologischer Atlas von Deutschland, Kapitel 5.5 Mittlere jährliche Grundwasserneubildung. – Hrsg. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz; <https://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HAD/index.html?lang=de> [abgerufen am 26.07.2022].
- Braun, A., K. Auerswald & J. Geist. 2012. Drivers and spatio-temporal extent of hyporheic patch variation: Implications for sampling. – PLoS ONE, 7(7): e42046. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0042046>.
- Cerdan, O., G. Govers, Y. Le Bissonnais, K. Van Oost, J. Poesen, N. Saby, A. Gobin, A. Vacca, J. Quinton, K. Auerswald, A. Klik, F. J. P. M. Kwaad, D. Raclot, I. Ionita, J. Rejman, S. Rousseau, T. Muxart, M. J. Roxo & T. Dostal. 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. – Geomorphology, 122(1–2): 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.011>.
- Dethier E. N., C. E. Renshaw & F. J. Magilligan. 2022. Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans. – Science, 376(6600): 1447–1452. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn7980>.
- Drewes J. E., S. Karakurt, L. Schmid, M. Bachmayer, U. Hübner, V. Clausnitzer, R. Timmermann, P. Schätzl & S. McCurdy. 2018. Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderungen für die Trinkwassergewinnung in Deutschland. – UBA-Texte, 59: 117 S. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/dynamik-der-klarwasseranteile-in> [abgerufen am 26.07.2022].
- Geist, J. & K. Auerswald. 2007. Physicochemical stream bed characteristics and recruitment of the freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*). – Freshwater Biology, 52(12): 2299–2316. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01812.x>.
- Geist, J. & K. Auerswald. 2019. Synergien im Gewässer-, Boden-, Arten- und Klimaschutz am Beispiel von Flussauen. – Wasserwirtschaft, 109(11): 11–16. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1520446/1520446.pdf> [abgerufen am 26.07.2022].
- Guillemette, F., C. Vallee, A. Bertolo & P. Magnan. 2011. The evolution of redd site selection in brook charr in different environments: same cue, same benefit for fitness. – Freshwater Biology, 56(6): 1017–1029. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02542.x>.
- Mauch, C. & T. Zeller. (Hrsg.) 2008. Rivers in history: perspectives on waterways in Europe and North America. – University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, PA, 256 S.
- Montgomery, D. R. 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. – Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 104(33): 13268–13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>.
- Mull, K. E. & M. A. Wilzbach. 2007. Selection of spawning sites by Coho Salmon in a northern California stream. – North American Journal of Fisheries Management, 27(4): 1343–1354. <https://doi.org/10.1577/M06-054.1>.
- Nilsson C., C. A. Reidy, M. Dynesius & C. Revenga. 2005. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. – Science, 308(5720): 405–408. <https://doi.org/10.1126/science.1107887>.
- Patt, H. 2018. Naturnaher Wasserbau. – Springer Vieweg, Wiesbaden, 472 S. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22478-3>.
- Poschlod, P. 2016. Geschichte der Kulturlandschaft. – Ulmer, Stuttgart, 320 S.
- Rühlmann J., M. Körschens & J. Graefe. 2006. A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. – Geoderma, 130(3–4): 272–283. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.01.024>.
- Seibert, S. P. & K. Auerswald. 2020. Hochwasserminderung im ländlichen Raum. Ein Handbuch zur quantitativen Planung. – Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 236 S. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61033-6>.
- Sternecker, K., M. Denic & J. Geist. 2014. Tim-

- ing matters: species-specific interactions between spawning time, substrate quality, and recruitment success in three salmonid species. – *Ecology and Evolution*, 4(3): 2749–2758. <https://doi.org/10.1002/ece3.1128>.
- Vörösmarty, C. J., P. B. McIntyre, M. O. Gessner, D. Dudgeon, A. Prusevich, P. Green, S. Glidden, S. E. Bunn, C. A. Sullivan, C. R. Liermann & P. M. Davies. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315): 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>.
- Witzel, L. D. & H. R. Maccrimmon. 1983. Redd-site selection by brook trout and brown trout in southwestern Ontario streams. – *Transactions of the American Fisheries Society*, 112(6): 760–771. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1983\)112<760:RSBTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1983)112<760:RSBTA>2.0.CO;2).
- Zarfl, C. & F. E. Dunn. 2022. The delicate balance of river sediments. – *Science*, 376(6600): 1385–1386. <https://doi.org/10.1126/science.abq6986>.

Diskussion

S. Schmutz: Danke für den interessanten Vortrag und die provokanten Hypothesen. In der Literatur findet man natürlich sehr viele Studien, die den Schwerpunkt auf den Eintrag von Feinsedimenten legen. Ich unterstreiche die hydrologische Komponente und die wechselnden Strömungen, um den Porenraum freizuhalten, kann aber nicht unterschreiben, dass das Feinsediment keine oder nur eine so geringe Bedeutung hat. Sie haben plakativ die geogenen Eintragsraten dargestellt, aber Sie haben nicht gesagt, dass es ein offenes System ist, durch das die Feinsedimente durchtransportiert werden, und dass es eine Dynamik gibt, die garantiert, dass es unter natürlichen Zuständen zu keiner Akkumulierung kommt. Das System trägt auch einen gewissen anthropogenen Eintrag. Aber irgendwann kommt ein Punkt, an dem das System diese Feinsedimente nicht mehr aufnehmen kann. Daher möchte ich es nicht so im Raum stehen lassen, dass wir die Gewässer ruhig mit Feinsedimenten belasten können, wenn wir die Hydrologie bzw. die Morphologie wieder in Ordnung bringen. Natürlich würde das die Resilienz des Systems sehr erhöhen und das System würde mehr Feinsedimente vertragen, aber ich denke, in so einem »Multi-Stressor-Setting«, wie wir es von Herrn Borchardt gehört haben¹, ist es genauso wichtig, auch den Feinsedimenteintrag zu reduzieren.

K. Auerswald: Auch ich kenne viele Studien, die den Feinsedimenteintrag und die ackerbauliche Nutzung eindeutig korrelieren. Die Frage, die sich mir stellt, ist aber, wie die natürliche Reinigung des Systems funktioniert. Häufig wird gesagt, durch Umlagerung. Aber ich kann mir nicht vorstellen, wie 30 cm Gewässerboden umgelagert werden soll. Das mag vielleicht im alpinen Bereich gehen, aber dann bekommen wir eine sehr

starke Eintiefung. Sie können sich nun überlegen, die Landnutzung so zu verändern, dass es zu keiner Kolmation kommt. Dann müssen Sie aber die Frage beantworten, wie Sie auf Werte unterhalb der geologischen Erosion kommen wollen. Bei der geologischen Erosionsrate bräuhete es 20 Jahre bis zur Kolmation – außer es gibt einen Prozess, der das Interstitial ausreichend reinigt. Der andere Punkt ist, dass wir in der Landschaft viel verändert haben und jetzt von den Landnutzern fordern, den Feinsedimenteintrag zu ändern, da sie allein verantwortlich wären. Damit ich nicht falsch verstanden werde: Ich bin Bodenkundler und es bekümmert mich äußerst, welche hohen Abtragsraten wir haben, und ich halte das für eine Katastrophe. Ich bin sehr dafür, sie so weit wie möglich zu reduzieren. Aber für dieses Problem der Kolmation wird es nicht reichen, da die ursächlichen Gründe andere sind.

B. Rutkowski: Nach Ihren Ausführungen ist die Schwammwirkung in der Fläche ganz wesentlich, um die Reinigungsleistung in den Oberflächengewässern aufrechterhalten zu können. Wie kann es sein, dass die Drainage von Niedermooren, die Neuanlage oder auch die Verbesserung von Drainage-Rohrsystemen in Niedermooren nach wie vor als gute fachliche Praxis den Landwirten zugestanden wird? Ich will hier nicht die Landwirte kritisieren, denn sie verlassen sich natürlich auf ihre Ämter für Landwirtschaft und Forsten. Durch diese »gute fachliche Praxis« bekommen wir aber eine Flächenentwässerung, die genau diese Probleme nach sich zieht. In Zukunft werden wir Flächen wieder bewässern müssen, nachdem wir sie zuerst trockengelegt haben. Gibt es hier nicht eine Notwendigkeit politischen Handelns?

K. Auerswald: Das Ganze ist politisches Handeln. Ökonomisch betrachtet zählt ein einzelner Flächennutzer und damit auch der einzelne Landwirt als Polypolist. Polypolisten können den Markt nicht verändern, sondern passen sich dem Markt an. Aber die Vorgaben und die Förderinstrumente der Politik gehen eindeutig in eine andere, ungünstige Richtung. Deswegen habe ich auch die Drainagekarte gezeigt: Das ist staatliches

1 Borchardt, D. 2023. Multiple Stressoren in Oberflächengewässern: Welche Rolle spielt der Klimawandel? – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Gefährdung und Schutz von Oberflächengewässern. Pfeil, München: 17–30.

Handeln. Der Landwirt freut sich natürlich, wenn er Ackerbau betreiben kann, wo vorher Grünland war – aber es ist staatliches Handeln. Oder denken Sie an die enorme Zunahme des Maisanbaus durch Biogas. Dass dadurch Probleme auftreten werden, war schon im Vorneherein bekannt, nicht nur in wissenschaftlichen Kreisen. Aber das war politischer Wille, und zwar sehr stark von Bayern ausgehend, wie ich selbstkritisch anmerken muss.

C. Leeb: Auch ich denke, dass die Kolmation sehr stark am Feinsedimenteintrag liegt. Aus der praktischen Erfahrung kommt mir in Ihrer Betrachtung die Unterscheidung Schwebstoff und Sediment zu kurz. Was wir bei dem schwedischen Fluss gesehen haben, war zunächst eine Färbung durch Schwebstoff. Erst wenn die Fließgeschwindigkeit langsamer wird und die Schleppspannung abnimmt, wird daraus Sediment. Wenn ich mir bei uns das Ampergebiet rund um Freising im tertiären Hügelland mit den vielen kleinen Bächen ansehe, so kommt dort sehr viel Eintrag an Feinsediment aus der Landwirtschaft. Entlang des Laufs der Glonn oder der Amper wird das Gefälle geringer und die Schleppspannung geringer und dadurch lagert es sich in den Gewässern ab. Natürlich sind weitere Einflüsse wie die Wasserkraft, durch die die Fließgeschwindigkeit nochmals herabgesetzt wird, messbar und merkbar. Aber ich denke, dass der Haupteintrag tatsächlich aus dem Feinsediment kommt und dass das Fließgeschehen eine untergeordnete Rolle spielt.

K. Auerswald: Wie erklären Sie sich dann, dass schwebende Flüsse existieren?

C. Leeb: Natürlich gibt es Flüsse, die sich aufgrund der flachen Gefälle und Fließgeschwindigkeiten langsam in der Sohle zusetzen, wenn die Topografie flacher wird. Sonst müsste die Würm nach dem Leutstettener Moos versi-

ckern. Aber ich denke, das ist auch ein natürlicher Vorgang, weil die Würm schon länger fließt, als es die Landwirtschaft dort gibt.

K. Auerswald: Meine Frage war eine andere: Wieso wird die Diskrepanz zwischen dem hydraulischen Potenzial im Fluss und im Grundwasser nicht überbrückt?

C. Leeb: Da ist meines Erachtens die These mit den Dämmen und der Abdichtung schon falsch. Wenn die Dämme wirklich so gefüllt sind, haben wir Hochwasser und hohe Fließgeschwindigkeiten, und da legt sich kein Sediment nieder, sondern dies geschieht in der ablaufenden Welle. Aber es ist nicht so, dass der verlorengegangene Rückhalteraum und die verlorengegangene Fläche für die Kolmation ursächlich wären. Natürlich: Wenn sich der Fluss ausdehnen könnte, würde sich sehr viel mehr in der Aue sedimentieren als im Fluss selber. Aber während der eigentlich ablaufenden Welle sedimentiert nichts.

K. Auerswald: Das habe ich auch nie behauptet. Ich habe vielmehr behauptet, dass der Wasserstrom bei gefüllten Dämmen in das Interstitial hineindrückt und dass damit das suspendierte Material ins Interstitial eindringt und es dort blockiert. In einem Fließgewässer sollte das Feinmaterial eigentlich gar nicht sedimentieren, sondern in Schwebe bleiben. Aber wenn durch den Druck das Wasser infiltriert, gehen auch die Feststoffe mit und werden dadurch sedimentiert.

C. Leeb: Aber genau das bezweifle ich: Dass im Hochwasserfall der Druck das Feinmaterial in das Interstitial drückt.

J. Geist: Leider muss ich aus Zeitgründen die Diskussion an dieser Stelle abbrechen und sie auf die nächste Pause verlagern, wo wir sie hoffentlich fortsetzen können.