

Matthias Brunke, Martin Purps und Carsten Wirtz

Furten und Kolke in Fließgewässern des Tieflands: Morphologie, Habitatfunktion für Fische und Renaturierungsmaßnahmen

Riffle and pool sequences in watercourses of lowlands: morphology, fishhabitat function, and recommended measures for their restoration

Naturnahe Fließgewässer sind durch einen geomorphologischen Formenreichtum charakterisiert, während degradierte Gewässer eher monotone Längs- und Querprofile aufweisen. Das Vorkommen von Furt-Kolk Sequenzen sowie eine hohe Tiefenvariabilität sind indikativ für eine hohe hydromorphologische Habitatqualität für wirbellose Tiere und Fische.

Im morphologischen Teil dieser Studie wurde die Sohltopographie von 14 naturnahen Abschnitten in Fließgewässern in Schleswig-Holstein tachymetrisch erfasst, um geomorphologische mesoskalige Formen zu vermessen, bestehende generelle flussmorphologische Beziehungen und Formeln regional zu validieren und die Tiefenvariabilität zu charakterisieren. Im biologischen Teil der Studie wurde an naturnahen Abschnitten zweier Gewässer die Verteilung von Fischarten auf die geomorphologischen Formen Furten, Kolke und Glides (längere ebene und tiefe Strecken) untersucht.

Die generellen Formeln zu Furt-Kolk Sequenzen lassen sich auch auf die untersuchten Gewässer des norddeutschen Tieflands übertragen, wobei jedoch die lokale Variabilität groß sein kann. Die Verteilung bodenorientierter Fischarten unterschied sich deutlich zwischen den Formen. Bei den Fischarten des Freiwassers waren diese Unterschiede weniger deutlich ausgeprägt. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen und laufender Erfahrungen in der Maßnahmenumsetzung werden detaillierte Empfehlungen für die Wiederherstellung von Furt-Kolk Sequenzen und zur Initiierung morphodynamischer Prozesse gegeben.

Schlagwörter: Fische, Furt, Hydromorphologie, Kolk, Renaturierung, Tiefenvariabilität

Near-natural watercourses are characterized by rich diversity of geomorphologic forms, while degraded waters rather feature monotonous longitudinal and cross-sectional profiles. The presence of riffle-pool sequences and wide variability in depth are indicative for good hydromorphologic quality of macroinvertebrate and fish habitats.

The channel-bed topography was recorded tachymetrically in 14 near-natural reaches of streams in Schleswig-Holstein in the morphological part of this study in order to measure geomorphologic mesoscale forms, to validate general fluviomorphologic relationships and formulas, and to characterize the variability in depth. In its biological part, the study investigated the distribution of several fish species over geomorphologic forms like riffle, pool, and glide in near-natural reaches of two streams.

The general formulas of riffle-pool sequences can be applied at North-German lowland streams, although local variability may be wide. The distribution of benthic fish species differed between the geomorphologic forms, while such differences were less apparent in highly mobile pelagic fish species. Finally, the paper gives detailed recommendations how to restore riffle-pool sequences and to initiate morphodynamic processes.

Keywords: Fish, hydromorphology, pool, restoration, riffle, variability in depth

1 Einleitung

Die Sohle vieler naturnaher Bäche und Flüsse ist durch Vertiefungen und Erhöhungen gekennzeichnet. Größere Vertiefungen werden als Kolke und größere Erhöhungen als Furten bezeichnet. Da sie in Abfolgen auftreten, werden sie als Furt-Kolk Sequenzen zusammengefasst, die typischer Weise bei mittleren Sohlgefällen kleiner als 1,5 % auftreten (BISSON et al. 2006, CHURCH 1992) (Abb. 1). Als geomorphologische Formen charakterisieren diese Sequenzen das Längsprofil naturnaher sand- und kiesgeprägter Fließgewässer.

Diese Formen wurden an vielen Fließgewässern durch zurückliegende Ausbau- und Unterhaltungsarbeiten entfernt, sodass die Sohle der degradierten und begradigten Bäche vergleichsweise eben ist. Viele dieser Gewässer reagierten auf diese Umgestaltung mit einem nahezu kontinuierlichen Feinsedimenttransport und, je nach Gefälle und Überbreite des Profils, entweder mit einer fortschreitenden Tiefenerosion oder mit Sandablagerungen auf der ausgebauten Sohle (BROOKES 1987). In der Folge verlo-

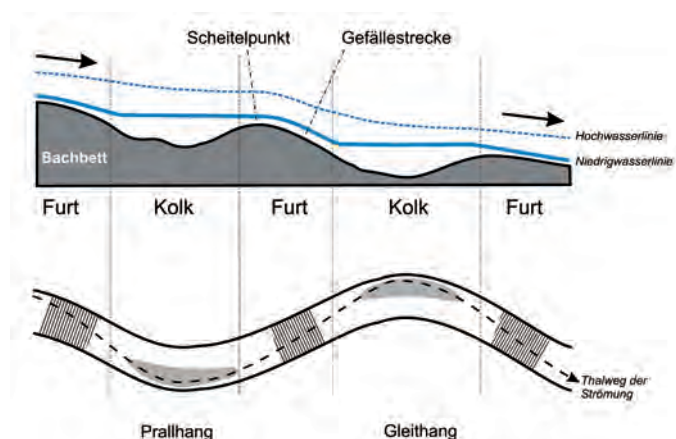


Abbildung 1

Schematische Darstellung einer Furt-Kolk Sequenz im Querschnitt (oben) und in der Aufsicht (unten). Grau: Kolke; schraffiert: Gefällestrecken der Furten

Schematic cross-sectional representation (above) and top view (below) of a riffle-pool sequence. Grey: pools; shaded: riffle stretches with downhill grade

ren solche Gewässer bedeutende Habitatfunktionen für Fische und wirbellose Tiere, sodass die heutige degradierte Morphologie zumeist ursächlich für den nicht guten ökologischen Zustand der Gewässer ist (BRUNKE & LIETZ 2011). Die Tiefenvariabilität im Längs- und Querprofil, die auch die Substrat- und Strömungsdiversität erheblich beeinflusst, ist dabei eine Kenngröße für die Habitatqualität für Fische und wirbellose Tiere.

Furten sind natürlicherweise der Laichplatz für kieslaichende Fischarten wie z.B. der Elritze und der Forelle. Das Fehlen derartiger Strukturen verhindert die Reproduktion dieser Charakterarten vieler Fließgewässer in Schleswig-Holstein (BRUNKE 2008). Daher wurden mitunter Kieslaichplätze für lachsartige Fische im Rahmen von Artenhilfsmaßnahmen angelegt. Die Funktion der angelegten Laichplätze ist jedoch zumeist von nur kurzer Dauer, da sie schnell mit Feinsedimenten verstopfen (GERKEN 2006, IVERSEN et al. 1993, MADSEN & TENT 2000). Der Prozess der sogenannten Kolmation durch infiltrierte und sedimentierte Feinsedimente führt zu einer Verfestigung der Sohle, verringert die Porosität und die hydraulische Leitfähigkeit (BRUNKE 1999). In der Folge gelangt nicht mehr genügend Sauerstoff für eine erfolgreiche Entwicklung von Fischeiern in das Kieslückensystem (INGENDAHL 2001, LISLE 1989). Eine Neuanlage der verloren gegangenen Formen ist dennoch zweckmäßig, wenn bei der Planung geomorphologische Kriterien berücksichtigt werden, durch die sowohl das Risiko der Kolmation verringert wird, als auch weitere ökologische Funktionen, wie z.B. Habitatbildung für verschiedene strömungsliebende Tierarten, ermöglicht werden.

Der Artikel beginnt mit einer kurzen Übersicht zur Entstehung von Furt-Kolk Sequenzen. Anschließend werden Daten von Feldmessungen zur Hydromorphologie und zur Verteilung von Fischarten aus Fließgewässern in Schleswig-Holstein gegeben. Das Ziel der Feldmessungen war zum einen die Anwendbarkeit der globalen Formel zu Furt-Kolk Sequenzlängen regional zu überprüfen und zum anderen die Relevanz der Formen für die Habitatbindung von Fischarten zu untersuchen. Abschließend werden praktische Empfehlungen für die Einbringung von Kies und die konkrete Anlage von Furten als Restaurationsmaßnahme gegeben.

2 Entstehung von Furt-Kolk Sequenzen

Furten setzen sich aus abgelagertem kiesig-steinigem Material zusammen, das durch den Sedimenttransport verfrachtet wurde. Im Längsprofil stellen Furten kurze Teilstrecken mit erhabenen Stein- und Kieslagern dar, die flache Passagen mit erhöhtem Längsgefälle ausbilden und durch schnelles, turbulentes Fließen charakterisiert sind. Hydraulisch erhöhen sie die Rauheit der Sohle, da das Grobmaterial ein erosionsresistentes Sohlendeckwerk ausbildet. Furten bilden sich aus dem groben Korn einer oberstrom gelegenen, lokalen Tiefenerosion, die an dieser Stelle einen Kolk entstehen lässt (SEAR et al. 2003).

Bänke unterscheiden sich von Furten, da sie nicht durch die Ablagerungen des erodierten Grobkorns aus Kolken entstehen, sondern Ablagerungen des gesamten Feststofftransports darstellen (SCHERLE 1999). Bänke in Tieflandbächen bestehen so aus Sanden und abgesetzten Schwebstoffen. Sie bilden sich z.B. als ortsfeste Seitenbänke hinter Gleithängen oder an strömungsberuhigten Uferbereichen. Bänke sind im Gegensatz zu Furten instabile Formen, die je nach Durchflusssituation wieder in Suspension geraten oder sich als Geschiebe flussab bewegen.

Mitunter finden sich oberhalb von Furten auch längere tiefere Strecken, die jedoch keine besondere morphologische Struktur aufweisen. Diese Formen werden im Englischen je nach Gefälle und Strömung als Glide oder Run bezeichnet (BISSON 1982). Solche Formen entstehen natürlicherweise wahrscheinlich aus gefüllten Kolken, sodass sich bei geringer Sedimentnachlieferung erneut Kolke ausbilden würden. In hydromorphologisch beeinträchtigten Bächen zeigen längere Strecken mit Glides die Degradation an; in diesen Strecken ohne Furten und Kolke sind die Tiefenvariabilität sowie Strömungs- und häufig auch Substratdiversität reduziert.

Der Sedimenttransport findet in naturnahen Abschnitten von Kolk zu Kolk über die dazwischen befindlichen Furten statt, die vergleichsweise lagestabil sind. Die Einbindung größerer Steine und Blöcke erhöht die Stabilität der Furten. Furten tragen so zumeist wenig zu der transportierten Sedimentfracht bei und bleiben bei Hochwasser erhalten. Stabile Furten lassen sich an der dunklen oberflächlichen Sedimentschicht erkennen, die ein verfestigtes Gefüge aufweist.

Furten können jedoch auch über jüngeren Kiestransport entstehen. Solche aktiven, instabilen Furten verfügen über neues und daher helles Korn, das locker aufliegt. Mit der Zeit können auch diese Furten sich verdichten und so räumlich fixieren, wenn sich die Mobilisierung von Bettsedimenten und der Sedimenttransport von oberstrom reduzieren (SEAR et al. 2003).

Sobald sich Furt-Kolk Sequenzen in einem Gewässer gebildet haben, stabilisieren sich diese Formen durch verschiedene hydromorphologische Mechanismen. (a) Die turbulente Strömung über einer Furt strukturiert die Furtsedimente zu einer gröberen und dichter gepackten Deckschicht, die bei Hochwässern erosionsresistenter ist. (b) Die sich bei einem Hochwasser ausbildenden hydraulischen Kräfte sind am stärksten in den Kolken, sodass hier Sedimenttransportraten und die Erosion am stärksten sind. (c) Der durch die Furt-Kolk Morphologie etablierte Sedimenttransport von Kolk zu Kolk fördert den Erhalt von Furten, da hier größeres Sediment abgelagert wird. (d) Die durch die Furt-Kolk Morphologie ausgebildete Sekundärströmung behindert die Sedimentablagerung in den Randbereichen der Kolke, sodass diese nach ihrer Entstehung dazu tendieren, auch nicht wieder gefüllt zu werden (SEAR et al. 2003).

Kolke sind hinsichtlich ihrer Tiefe und Sedimentzusammensetzung zeitlichen Veränderungen unterworfen, da sich während Niedrig- und Mittelwasserphasen transportiertes Feinmaterial in den Kolken ablagern kann. Während eines kolkbildenden Hochwassers werden diese Feinsedimente wieder ausgespült.

Lokale Tiefenerosionen, die Kolke entstehen lassen, können verschiedene Ursachen haben, sodass sich folgende Kolktypen unterscheiden lassen (BISSON et al. 1982):

- (1) *Krümmungskolk*. Eine Krümmung im Lauf erhöht die Strömung in der Außenkurve, sodass am Prallufer eine Tiefenerosion stattfinden kann.
- (2) *Sturzkolk*. Eine Querstruktur wie ein Wehr oder ein schräg liegender Uferbaum erzeugt einen Rückstau nach oberstrom und einen Absturz des Wassers nach unterstrom, wo sich ein Tosbecken ausbildet.
- (3) *Engenkolk*. Eine mitunter auch etwas längere Einengung des Gerinnes durch z.B. eng beieinander stehende Ufer-

bäume führt zu einer mittigen Beschleunigung des Durchflusses, auf die das Gerinne erosiv mit der Ausbildung einer wannenförmigen Tiefenrinne reagiert.

- (4) *Seitenkolk*. Lokale Hindernisse wie z.B. abgelagertes Totholz und Blöcke konzentrieren die Strömung seitlich und führen zu kleineren Kolken.
- (5) *Kehrwasserkolk*. Direkt unterhalb von Hindernissen am Ufer, z.B. einem größeren Uferbaum, kann sich eine Kreisströmung entgegengesetzt zur Stromrichtung (Kehrströmung) ausbilden, die eine seitliche Ausbuchtung in das Ufer erodiert.
- (6) *Unterströmungskolk*. Unterströmte Wurzeln und quer im Gerinne befindliche Totholzstrukturen können unterspült werden.
- (7) *Schnellenkolke*. Auf geraden Strecken, in denen der Durchfluss mäandriert, bilden sich in sedimentführenden Bächen alternierende Bänke mit dazwischen gelagerten Kolken aus.

3 Material und Methoden

3.1 Morphometrische Vermessung

An 14 Fließgewässern in Schleswig-Holstein erfolgten zwischen September und Oktober 2005 tachymetrische Vermessungen, geomorphologische Kartierungen, Kartierungen des Sohlsubstrats und Strukturkartierungen nach dem vor-Ort Verfahren (LAWA 2000). Untersucht wurden Abschnitte an drei sandgeprägten Bächen (Typ 14), sechs kiesgeprägten Bächen (Typ 16) und drei Flüssen (Typ 17) sowie zwei teilmineralischen Niederrungsbächen (Typ 19).

Die morphometrische Charakterisierung von Furt-Kolk Sequenzen erfolgt im Längsprofil entlang des Thalwegs. Der Thalweg beschreibt die longitudinale Stromlinie der größten Wassertiefen (LEOPOLD et al. 1964). Für jedes Gewässer wurden innerhalb eines Hauptuntersuchungsabschnitts und in zwei Nebestrecken von jeweils mindestens 100 m Länge für Bäche und 200 m Länge für Flüsse die geomorphologischen Strukturen kartiert. In den Hauptabschnitten aller Gewässer wurde die Gerinnemorphologie im Thalweg tachymetrisch in Meterabständen und an 10 Querprofilen mit mindestens 12 Punkten vermessen. Die Gesamtlängen der vermessenen Thalwege betrugen in Abhängigkeit von der morphologischen Vielfalt zwischen 200 m und 650 m. Für die Querprofile erfolgte der Bezug auf die höchste links- oder rechtsseitig gelegene Uferkante. Alle Messpunkte wurden zudem hinsichtlich der Reproduzierbarkeit mit einem lokalen Fixpunkt verknüpft und über GPS-Messungen georeferenziert. Die Fließgeschwindigkeiten bei Trockenwetterabfluss wurden mit einem akustischen Doppler-Geschwindigkeitsmesser (ADV) standardmäßig in vier verschiedenen Tiefen (90, 50, 20 und 5 % der Wassersäule als Abstand von der Sohle) an 6 Messstellen jedes Querprofils aufgezeichnet.

Die Kolkiefen wurden auf den sohlbreiten Wasserstand sowie auf die maximale unterstrom gelegene Sohlhöhe aus den Längsprofilen berechnet. Letztere wird als Restkolkentiefe („residual pool depth“) nach LISLE (1987) und MOSSOP & BRADFORD (2006) bezeichnet, da sie sich auf die Tiefe eines Kolkes bezieht, wenn kein Abfluss vorliegt.

Die Tiefenvariabilität der Thalwege wurde zum einen deskriptiv als Standardabweichung und Variationskoeffizient bezogen auf

den bordvollen sowie sohlbreiten Abfluss berechnet. Zum anderen wurde sie statistisch über die Standardabweichung der tachymetrischen Vermessung gegenüber der linearen Regressionsgeraden berechnet (Metrik MSE) (MOSSOP & BRADFORD 2006). MSE wird im Output gängiger Statistik-Software als „mean square error“ der Residuen aufgeführt und entspricht dem Quadrat des „Standard Error of the Estimate“. Höhere MSE Werte repräsentieren stärker variable Längsprofile. Die MSE Werte der untersuchten Bäche wurden einer Korrelationsanalyse mit morphologischen Variablen wie der bordvollen Gewässerbreite und der Einzugsgebietsgröße unterzogen. Die Tiefenvariabilität wurde so insgesamt für drei Abflusssituationen berechnet (kein, sohlbreiter und bordvoller Abfluss). Korrelationen zwischen hydromorphologischen Variablen wurden nach Spearman und schließende Tests wurden nach Kruskal-Wallis berechnet.

3.2 Untersuchung zur räumlichen Verteilung von Fischarten

Die Befischungen wurden mit stationären Geräten (Gleichstrom) vom Typ FEG 5000 und FEG 8000 der Firma EFKO und begleitend mit mindestens einem tragbaren Gerät des Typs DEKA Lord 3000 (Impulsstrom) während Trockenwetterphasen im Bereich des mittleren Niedrigwasserabflusses durchgeführt. Vor jeder Befischung wurde die zu untersuchende Strecke mit einer Länge von 100–200 m ausgemessen und mit Netzen (Maschenweite 10 mm) in zwei bis drei Kompartimente je nach Lage der geomorphologischen Formen abgesperrt. Die zu befischenden Strecken wurde dreimal hintereinander flächendeckend gegen die Strömung beprobt. Um den Fischen die Möglichkeit zur Regeneration nach der physiologischen Belastung durch die Elektrofischung einzuräumen, wurde eine Pause von mindestens einer Stunde zwischen den Befischungen eingehalten. Die Fische wurden bestimmt und die Totallängen vermessen. Die Altersklassen wurden anhand der Totallängen nach Einteilungen der ARGE Elbe (zit. in SCHAARSCHMIDT et al. 2005) zugeordnet.

Für die Studie wurden je ein Abschnitt in dem Metarhithral der sandgeprägten Osterau (Typ 14) und dem Hyporhithral der kiesgeprägten Bille (Typ 17) ausgewählt. Die fischbiologischen Untersuchungen und Strukturkartierung für die Zustandsermittlung nach der EG-WRRL belegen, dass in diesen Abschnitten noch über längere Strecken naturnahe Sohlformen vorhanden sind und die Fischfauna sich im guten ökologischen Zustand befindet (eigene Daten). Insgesamt wurden 35 Formen identifiziert und im August und September 2006 befischt. Dabei wurden vier Formen unterschieden:

- a) Furt: Sanfte oder auch stärkere Aufwölbungen der Gewässersohle im Längsprofil des Gewässers, die sich über die ganze Gewässerbreite erstrecken und auf der Ansammlung eines besonders groben Sediments beruhen. Die Wassertiefe ist erheblich reduziert und der Wasserspiegel ist sichtbar geraut, n = 6.
- b) Kolk: Auf Teilstrecken des Gewässers ist die Wassertiefe deutlich tiefer als die durchschnittliche Wassertiefe des Abschnitts; beobachtete Varianten: Schnellen-, Krümmungs-, Engen- und Rückstaukolk, n = 16.
- c) Glide: Monotoner Gewässerabschnitt mit geringen Veränderungen im Quer- und Längsprofil; beobachtete Varianten: tiefere Glides und flachere Runs, n = 11.
- d) Bank: In Fließrichtung gestreckte und vom übrigen Gewässerbett deutlich abgegrenzte örtliche Geschiebeansammlung; beobachtete Varianten: Längsbank, Kurvenbank, n = 2.

Abschließende Tests zur Verteilung der Fischarten über die untersuchten Formen wurden nach Kruskal-Wallis berechnet. Die statistischen und graphischen Auswertungen erfolgten mit der Software Systat 10.2.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Morphologische Untersuchung

In naturnahen Gewässern dokumentiert ein Längsprofil entlang des Thalwegs die Sohltopographie, aus der sich die Furt-Kolk Morphologie ablesen lässt (Abb. 2). Die Lage der Formen wird erheblich durch die Lauform, Uferbäume und anliegende steinig-kiesige sowie sandig-schluffige Böden bestimmt. Die Unregelmäßigkeit der Formen nimmt mit Grobholzablagerungen im Gerinne und Uferbäumen zu. Die vermessenen Furten bestanden zumeist aus mehreren Gefällestrrecken mit dazwischen gelagerten geringen Eintiefungen (Abb. 1 und Abb. 2). Die ver-

messenen Längsprofile zeigen, dass regelhafte Abfolgen nicht zwingend vorliegen, sondern Furten und Kolke unregelmäßige Ausprägungen haben.

In der internationalen Literatur wird ein Abstand zwischen Furten bzw. Kolken im Bereich der 3- bis 9-fachen sowie im Mittel der 5- bis 7-fachen Sohlbreite genannt (GREGORY et al. 1994, LEOPOLD et al. 1964). Vergleichbare Mittelwerte wurden auch an Bächen in Schleswig-Holstein festgestellt (Tab. 1). Anhand entsprechender Stichproben lassen sich genauere empirische Beziehungen für verschiedene morphometrische Parameter berechnen, die jedoch nur regional für die erfassten Stichproben bzw. Gewässer gültig sind (HARNISCHMACHER & ZEPP 2003).

Die Profilquerschnitte sind bei Furten in der Regel symmetrisch, während sie bei Kolken asymmetrisch sind (Abb. 3). Obgleich die

Fließgeschwindigkeiten in den Gefällestrrecken der Furten hoch sein können, sind ufernahe Bereiche häufig strömungsberuhigt, sodass Furten bei einem geringen Wassertiefenspektrum durch eine hohe Strömungsdiversität charakterisiert sind (Abb. 4). Die morphologisch unspezifischen Glides und die Kolke weisen bei einem größeren Tiefenspektrum eine geringe Strömungsdiversität auf (Abb. 4).

Die Restkolkentiefe unterschied sich signifikant zwischen kies- und sandgeprägten Fließgewässern

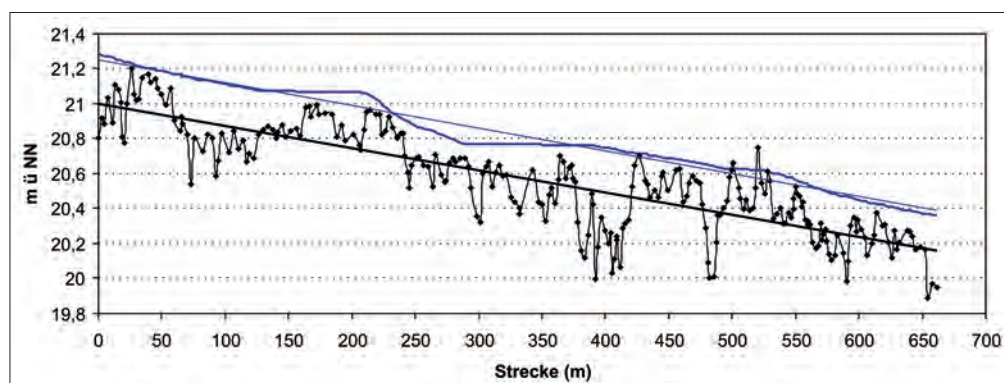


Abbildung 2

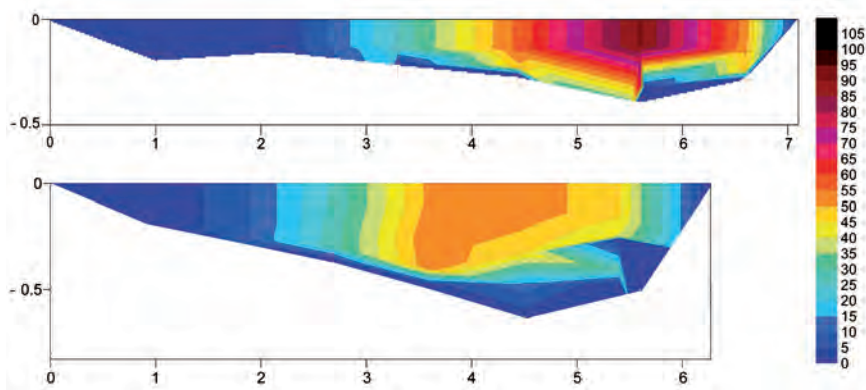
Längsprofil der Sohle und der Wasserspiegellage entlang des Thalwegs eines naturnahen Baches, der Krückau bei Langeln in Schleswig-Holstein (schwarz: Sohltopographie, schwarze Gerade: mittleres Sohlgefälle, blau: Wasserspiegellage, blaue Gerade: mittlere Wasserspiegellage)

Thalweg profile of the river bottom and water level of the near-natural stream Krückau, near Langeln in Schleswig-Holstein. (Black line and dots: topography of the streambed; black straight line: mean bottom slope; blue line: water level; blue straight line: mean water-surface slope)

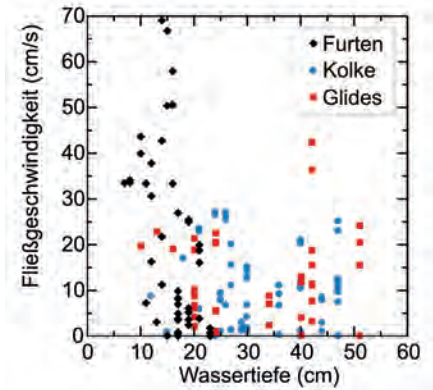
Tabelle 1

Morphometrische Werte zu Furten und Kolken von untersuchten Bächen in Schleswig-Holstein
Morphometric characteristics of riffles and pools in streams in Schleswig-Holstein

	Krückau (Langeln)	Barnitz (Kretholz)	Hellbach (NSG)	Osterau (Bass)	Treene (Tarpholz)	Bille (Doktorbrücke)
LAWA-Typ	16	16	14	14	14	17
Einzugsgebietsgröße (km ²)	34,3	35,6	69,5	120	177,5	218
bordvolle Breite (m)	5,4	8,3	5,8	9,1	11,5	12,2
Sohlbreite (m)	4,2	5,0	4,6	6,2	7,4	9,2
mittleres Streckengefälle (%)	0,1	0,14	0,07	0,15	0,1	0,2
Anzahl Furten pro 100 m	3,6	2,6	3,7	1,9	3,0	2,6
mittlere Furtlänge (m)	13	15	15	25	20	19
Verhältnis Furtabstände (Scheitelpunkte) zur Sohlbreite (m)	6,1	7,7	5,8	5,3	7,2	4,0
mittlere Höhe der Furten über mittlerer Sohlhöhe (m)	0,10	0,10	0,12	0,11	0,22	0,10
Anzahl Kolke pro 100 m	4,0	2,9	3,7	2,9	2,0	2,6
mittlere Tiefe der Kolke unter mittlerer Sohlhöhe (m)	0,15	0,15	0,17	0,17	0,37	0,16
mittlere maximale Tiefe der Kolke unter mittlerer Sohlhöhe (m)	0,40	0,34	0,24	0,52	0,65	0,27
mittlere Restkolkentiefe (m)	0,46	0,47	0,53	0,55	0,76	0,41
Metrik MSE	0,024	0,023	0,029	0,037	0,066	0,026


Abbildung 3

Verteilung der Fließgeschwindigkeiten (cm/s) in Querschnitten (m) durch eine annähernd symmetrische Furt und einen asymmetrischen Kolk
Distribution of flow velocities (cm/s) in cross sections (m) of a nearly symmetric riffle and of an asymmetric pool


Abbildung 4

Beziehung zwischen Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen in Furten, Kolken und Glides in einem naturnahen Bach bei sohlbreitem Abfluss
Relationship between flow velocities (cm/s) and water depths in riffles, pools, and glides in a near-natural stream at channel-bed flow

(KW-Test, $p < 0,05$). Die mittlere Restkolkentiefe bei sandgeprägten Gewässern von 0,57 m war um 0,18 m tiefer als bei kiesgeprägten Gewässern mit einer mittleren Tiefe von 0,39 m (Abb. 5). Die Restkolkentiefe war positiv korreliert mit dem mittleren Sandanteil ($r = 0,7$), negativ korreliert mit dem Kies- und Steinanteil ($r = -0,51$) der Sohle und nicht korreliert mit der Einzugsgebietsgröße.

Die drei Kenngrößen zur Tiefenvariabilität waren hoch korreliert, sodass folgende weitere Analysen nur mit dem Metrik MSE durchgeführt wurden. Die für die naturnahen Gewässer in Schleswig-Holstein berechneten Werte (Abb. 5) lagen im gleichen Spektrum wie bei den von MOSSOP & BRADFORD (2006) untersuchten naturnahen Gewässern. Die MSE korrelierten mit der mittleren Wassertiefe ($r = 0,59$) sowie der Größe des Einzugsgebiets ($r = 0,53$).

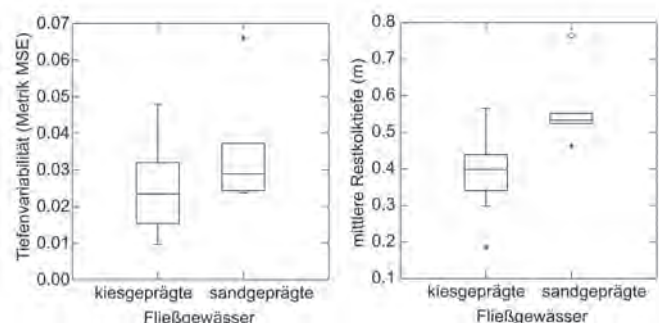
Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass typspezifische Unterschiede in der Tiefenvariabilität zwischen sand- und kiesgeprägten Bächen vorliegen. Die Erosionsstabilität des Sohlsubstrats spielt bei der Ausbildung von Kolken eine bedeutende Rolle. Die MSE korrelierten positiv mit dem mittleren Sandanteil an der Sohle ($r = 0,66$) und waren stark korreliert mit der Restkolkentiefe ($r = 0,87$). Bei mittleren Sandanteilen von 26 % für die kiesgeprägten und 37 % für die sandgeprägten naturnahen Gewässer waren die Beziehungen zwischen Kolkentiefe und Sandanteil positiv. Im Gegensatz zu den untersuchten Gewässern transportieren degradierte Bäche häufig einen exzessiven Sandanteil, der zu einer mehr oder weniger ebenen Sohle mit Sandrippeln führt, bei der die Kolke mit Feinmaterial gefüllt sind und so die Tiefenvariabilität minimal ist. Solche degradierten Bäche bestehen nur noch aus Glidestrukturen.

Obwohl sich die Tiefenvariabilität bei bordvollem Abfluss morphodynamisch ausbildet, konnten keine Korrelationen zu hydraulischen Variablen (breitenspezifische Strömungsleistung, Sohlschubspannung bordvoll und sohlbreit) und morphologischen Variablen (Windungsgrad, Gefälle) festgestellt werden.

4.2 Fischbiologische Untersuchung

Die Fischfauna der untersuchten Bäche Osterau und Bille unterscheidet sich aufgrund biogeographischer Verbreitungen

(Groppe und Schmerle in der Bille) sowie der Durchgängigkeit zur Nordsee (Flunder, Flussneunauge, Meerforelle in der Osterau). Daher konnten die Formen für beide Bäche nicht gemeinsam ausgewertet werden. In der Osterau dominierten Forelle, Aal, Elritze und Neunaugen, in der Bille demgegenüber Elritze, Forelle, Groppe, Schmerle und Hasel. Insgesamt wurden 4.701 Individuen gefangen, die sich auf 18 Arten verteilen. In der Bille und Osterau wurden Flächen von insgesamt 4.575 bzw. 2.714 m² befischt und insgesamt 4.008 bzw. 693 Individuen nachgewiesen. Aufgrund der Fangmengen konnten Analysen für folgende Fischarten vorgenommen werden: Forelle, Elritze, Hasel, Schmerle, Groppe, Gründling, Aal sowie den Larven (Quertern) von Bach- und Flussneunauge.


Abbildung 5

Box-Plots zur Tiefenvariabilität der Gewässersohle (Metrik MSE) und der mittleren Restkolkentiefe sand- und kiesgeprägter Fließgewässer. Metrik MSE ist eine Kenngröße zur Tiefenvariabilität des Thalwegs und wird als die Standardabweichung der gemessenen Sohlhöhen gegenüber der Regressionsgeraden der Sohlhöhen statistisch berechnet.
Box-plots of variability in channel depths (metric MSE; mean square error of linear regressions) and mean residual pool depths of sand- and gravel-dominated streams. The metric MSE is a characteristic of the thalweg depth variability and is calculated as the standard deviation of measured channel-bottom levels against the regression line.

Die mittlere Sohlbreite der Osterau betrug 6,2 m, die der Bille 9,2 m. Als sandgeprägtes Gewässer war jedoch die mittlere Tiefe der Osterau größer als die der kiesgeprägten Bille. Dies zeigte sich insbesondere in deutlich tieferen Kolken und einer größeren Anzahl an Kolken (Tab. 2).

Tabelle 2

Mittlere und maximale Wassertiefen von fischbiologisch untersuchten geomorphologischen Formen in der sandgeprägten Osterau und kiesgeprägten Bille

Mean and maximum water depths of fishbiologically investigated geomorphologic forms in the streams Osterau (sand-dominated) and Bille (gravel-dominated)

	mittlere Tiefe (m)		maximale Tiefe (m)	
	Osterau	Bille	Osterau	Bille
Furt	0,44	0,27	0,49	0,51
Kolk	0,62	0,41	1,55	0,83
Glide	0,5	0,36	0,77	0,83

4.3 Fischarten und geomorphologische Formen

In der Osterau wurden sehr hohe Dichten der Forellen in den Furten nachgewiesen, bedingt durch einen sehr hohen Anteil juveniler Tiere (Altersklasse, AK 0+, I+; bis 14,9 cm) von etwa 80 %, der in den anderen geomorphologischen Formen hingegen bei etwa 40 bis 50 % lag. In den Kolken war der Anteil der Längengruppe > 26 cm (AK IV+) erhöht. In der Bille war die Anzahl von Forellen in den Furten und den Glides höher als in den Kolken (Abb. 7). Im Gegensatz zur Osterau konnten in der Bille jedoch keine Unterschiede in der Altersklassenverteilung über die Formen festgestellt werden, also auch keine Präferenz der juvenilen Tiere für die Furten. In der Bille waren die Anzahlen an größeren Forellen sehr gering (AK IV+: 2,5 % Anteil) und die Alterklassen II+ und III+ wiesen etwas höhere Dichten in den Glides auf. In der Osterau kommen auch größere Bach- und Meerforellen vor (AK IV+: 12,8 % Anteil), die möglicherweise generell aufgrund der tiefen Kolke bessere Habitatbedingungen für größere Individuen liefert als das vergleichsweise flache Gewässer Bille. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass wahrscheinlich dichteabhängige Prozesse in Abhängigkeit vom Habitatangebot die Verteilung der juvenilen und präadulten Forellen beeinflussen.

Die Elritze wurde in beiden Gewässern über alle Formen angetroffen, hatte ihren Verbreitungsschwerpunkt jedoch in den Kolken. Die Daten weisen darauf hin, dass für die Längengruppe bis zu 4 cm (AK I+) der Verbreitungsschwerpunkt jedoch in den Furten oder allgemein Flachwasserbereichen lag, da diese AK auch in größeren Anteilen an der Bankstruktur nachgewiesen wurde. Der Schwerpunkt des Vorkommens des Hasels in der Bille lag bei den Kol-

ken, wobei auch ein hoher Nachweis in den Glides gelang. Die Dichten in den Furten waren jedoch deutlich geringer. Der Gründling präferierte in der Bille Kolke vor Glides und Furten (Abb. 7); diese Unterschiede sind statistisch signifikant (KW-Test, $p = 0,025$).

Die Groppe und Schmerle wiesen in der Bille ein ähnliches Vorkommensspektrum auf. Beide präferierten die Furten und hatten in den Glides etwas höhere Dichten als in den Kolken (Abb. 7). Diese Verteilung war bei der Groppe klarer und statistisch signifikanter ($p = 0,016$) als bei der Schmerle ($p = 0,085$). Die Verteilung der Querder des Fluss- und Bachneunauges lieferte keine eindeutigen Hinweise auf mögliche Verbreitungsschwerpunkte, obschon in der Bille die Anzahlen in den Furten geringer waren als in den Kolken und Glides. Der Aal war in beiden Bächen über alle Formen etwa gleich verteilt.

4.4 Ökologische Bedeutung von Furt-Kolk Sequenzen

Furt-Kolk Sequenzen sind grundlegend für eine Tiefenvarianz sowie Strömungs- und Substratdiversität, die Kenngrößen der Habitatqualität für Fische und wirbellose Tiere sind (BRUNKE 2008, JUNGWIRTH et al. 2003). Furten und Kolke stellen sogenannte Mesohabitate dar, die eine Vielzahl von Mikrohabitaten für fließgewässertypische Arten enthalten. In Fließgewässern werden die lokalen Bedingungen der Mikrohabitate vornehmlich durch die Kornzusammensetzung, Wassertiefe, Strömungsbedingungen und das Angebot an Nahrungsressourcen definiert. Die Tiefenvariabilität bezogen auf den sohlbreiten Abfluss ist bedeutungsvoll für die Gewässerfauna, da sie die hydromorphologische Habitatdiversität charakterisiert; erfasst wird sie jedoch besser wasserstandsunabhängig entweder konkret über die Restkolkentiefe oder statistisch über den Metrik MSE.

Im norddeutschen Tiefland von Schleswig-Holstein, in dem ausgebauten Gewässersystem das Landschaftsbild prägen, sind

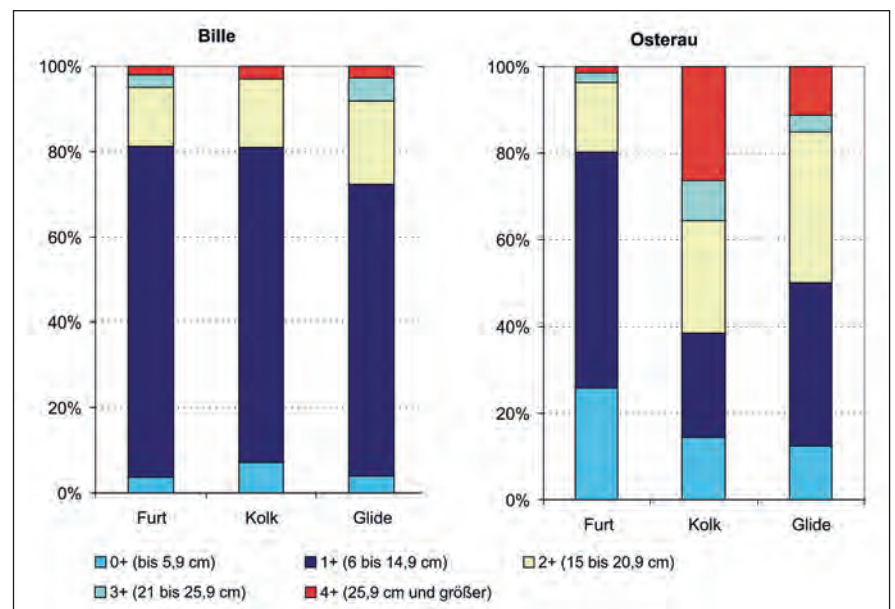


Abbildung 6

Verteilung von fünf Altersklassen der Forelle (0+ bis 4+) auf Furten, Kolke und Glides in der Bille und der Osterau
Distribution of five age classes of trout (0+ to 4+) in riffles, pools, and glides in the streams Bille and Osterau

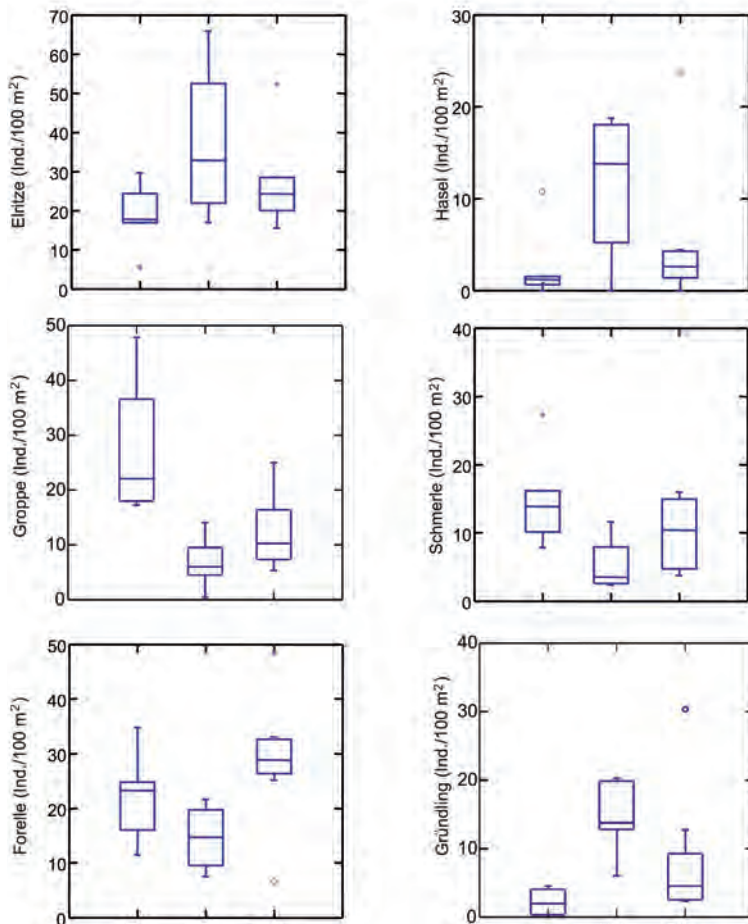


Abbildung 7

Verteilung von Elritzen, Haseln, Groppen, Schmerlen, Forellen und Gründlingen auf Furten, Kolke und Glides in der Bille, standardisiert auf 100 m² Wasseroberfläche
Distribution of minnow, dace, bullhead, stone loach, trout, and gudgeon in riffles, pools, and glides in the Bille stream, standardized on 100 m² water-surface area

Gewässer mit naturnahen Abfolgen von geomorphologischen Formen selten. Die ausgebauten Abschnitte ähneln sehr langen Glidestrecken, die eine geringere Tiefenvarianz, Strömungs- und Substratdiversität aufweisen. Furten und Kolke hingegen stellen geomorphologische, mesoskalige Formen dar, die charakteristisch für sand- und kiesgeprägte Bäche sind. Die hydromorphologischen Bedingungen unterscheiden sich grundlegend zwischen diesen beiden Formen, sodass eine unterschiedliche Verteilung verschiedener Fischarten und deren Lebensstadien je nach deren Lebensraumansprüchen plausibel ist.

Kolke bieten aufgrund der größeren Wassertiefen insbesondere Habitate für adulte Fische. Über Furten wird das Wasser aufgrund der hohen Turbulenz belüftet. Hier befinden sich, zumeist im obersten Bereich der Furt, die Laichplätze kieslaichender Fischarten sowie zumeist in den strömungsarmen, flachen Randbereichen die Habitate juveniler Fische. Mittige Bereiche der Furten werden durch juvenile Fische besiedelt, sofern grobe Steine und Blöcke vorhanden sind. Strömungsliebende wirbellose Tiere besiedeln insbesondere die Furten, da sie auf grobes Hartsubstrat, hohe Strömung und gute Sauerstoffversorgung angewiesen sind.

Grundsätzlich ist von einer diurnal, saisonal und im Laufe des Lebenszyklus der Arten wechselnden Nutzung der Formen auszugehen (JUNGWIRTH et al. 2003). Die hohe Mobilität vieler Arten und die ökologische Notwendigkeit für jede Art, sich auszubreiten, führen zu einer entsprechenden Streuung über die geomorphologischen Formen, sodass statistische Nachweise in Freilandstudien erschwert sind. Daher ist es nicht überraschend, dass sich bodenorientierte Fischarten wie Groppe, Schmerle und Gründling im Gegensatz zu Freiwasser-Schwarmfischarten auch am deutlichsten entlang der Formen verteilen. In dieser Studie konnten Präferenzen für die Groppe und den Gründling statistisch nachgewiesen werden und plausible Tendenzen für Forelle, Elritze, Hasel und Schmerle aufgezeigt werden. Die hier gewonnenen Ergebnisse werden von einer Studie aus Frankreich für diese Arten unterstützt (ROUSSEL & BARDONNET 1997).

4.5 Restaurationsmaßnahmen

In der Gewässerrestauration kann der durch den zurückliegenden Ausbau und Grundräumungen bedingte Verlust an Hartsubstrat durch Kies- und Steineinbringungen über die Anlage von Furten oder die Bereitstellung von Kiesdepots kompensiert werden. Grundsätzlich ist es zwar eher sinnvoll, über natürliche Prozesse in Fließgewässern morphologische Strukturen entstehen zu lassen als die Formen nachzubauen. In den degradierten Gewässern fehlt jedoch häufig der Kies, der für die natürliche Ausbildung von Furten erforderlich ist. In solchen Gewässern muss Kies als Restaurationsmaßnahme eingebracht werden, um das Habitatangebot für Fische und wirbellose Tiere zu erhöhen (PEDERSEN et al. 2009). Eine Kieseinbringung wirkt auch als Schutzmaßnahme in Gewässern, die sich in einem morphodynamischen Ungleichgewicht befinden und aufgrund einer fortschreitenden Tiefenerosion ihren Zustand fortlaufend verschlechtern.

Das Einbringen von Furten hat einen differenzierten Einfluss auf die Wasserstände. Der hydraulische Widerstand entsteht durch die Rauheit des groben Korns und die Form von Furt-Kolk Sequenzen. Dieser Widerstand ist jedoch nur bei geringen Wasserständen bedeutend und führt dann zur Erhöhung des Niedrig- bis Mittelwasserstandes. Mit steigendem Abfluss nimmt jedoch der Widerstand kontinuierlich ab. Bei bordvollem Abfluss führt dies dazu, dass der Wasserstand verglichen mit der Situation vor der Anlage nicht signifikant erhöht ist (SEAR & NEWSON 2004 sowie verschiedene hierin zitierte Studien). Es empfiehlt sich, die bordvolle Breite bei den Furtstrecken zu vergrößern und die Sohlbreite, insbesondere bei überbreiten Gewässern, im oberen Drittel etwas zu verschmalern (10 bis maximal 20 %), um Ablagerungen von Sandfraktionen auf der Gefällestrecke unbedingt zu vermeiden. Furten können im Kopfbereich auch am Ufer gesichert werden, um eventuelle Uferschädigungen durch Umspülungen zu verhindern. Je nach den lokalen Gegebenheiten kann es in begründeten Fällen erforderlich sein, Wasserspiegellagen mit Modellen vor einer Maßnahme zu berechnen.

Für kieslaichende Fische sollte sich oberhalb der Furt als Laichhabitat ein ausreichend tiefer Kolk befinden, der als Ruhezone wäh-

rend der Laichzeit dienen kann und in einen Anströmbereich zur Furt übergeht (MUNLV 2006). Das bevorzugte eigentliche Laichhabitat befindet sich unterstrom des Kolks bis in den Bereich des Scheitelpunktes der Furt (JUNGWIRTH et al. 2003). Ein geeignetes Laichhabitat sollte zumindest die Fläche von drei Laichgruben aufweisen. In dänischen Untersuchungen wurde ein Gefälle über den Laichplätzen von Forellen von 0,2 bis 1,7 % festgestellt (MADSEN & TENT 2000).

Das entscheidende Aufwuchshabitat für juvenile lachsartige Fische sind zumeist die strömungsberuhigten Randbereiche der Furt (ARMSTRONG & NISLOW 2006). Die Entfernung zum Aufwuchshabitat, in das sich die juvenilen Fische nach ihrem Schlüpfen aus dem Substrat verteilen, sollte gering sein (idealerweise unter 25 m, höchstens jedoch 100 bis 250 m), da ansonsten die Verlustraten durch Verdriftung und Prädation zu groß sind. Die Fläche beträgt idealerweise mehr als 1.500 m², ungünstigenfalls 200 bis 500 m² (MUNLV 2006).

Kolke sind die Folge einer häufigen Punkterosion im Gerinne und können daher nicht als dauerhafte Form direkt angelegt bzw. gegraben werden. Jedoch können durch die Anlage von Strömungslenkern punktuelle Tiefenerosionen angeregt werden, sodass hierbei Engenkolke und Seitenkolke entstehen können. Auf diese Weise wird die Tiefenvarianz insgesamt vergrößert. Der Nachweis positiver Effekte auf die Fischfauna gestaltet sich jedoch schwierig (PRETTY et al. 2003, STEWART et al. 2009), da diese morphologische Maßnahme für sich genommen noch keine biologische Regeneration ermöglicht. Zu beachten sind unbedingt weitere hierarchisch bedeutende Stressoren, das Wiederbesiedlungspotenzial und eine artspezifisch erforderliche, minimale räumliche Ausdehnung der restaurierten Strecken (BRUNKE & LIETZ 2011, RONI et al. 2008).

4.6 Konkrete Empfehlungen für die Restauration von Furten

Die Beachtung folgender Punkte ist bei der Anlage von Furt-Kolk Sequenzen in sand- und kiesgeprägten Fließgewässern (LAWA-Typen 14 und 16) zu empfehlen:

1. Eine Anlage von Furten ist in Gewässern sinnvoll, die nicht unter einer gravierenden Sanddrift leiden, da Sande kiesige Strecken überlagern oder die Kieslücken füllen. Zudem verhindert ein hoher Sandtransport die Ausbildung von Kolken. Gegebenenfalls ist es angebracht, Furten vor Feinsediment durch oberhalb angelegte, naturnahe Sandfänge zu schützen.
2. Um ökologische Erfolge mit der Anlage von Furten als Laich- und Aufwuchshabitate für Fischpopulationen zu erzielen, ist es sinnvoll, einen geomorphologischen Abschnitt in die Restauration einzubeziehen, der zumindest dem 30-Fachen der bordvollen Breite entspricht.
3. Bei vorhandenen Furtresten oder Restbeständen von kiesigen Arealen sollten Kies und Steine nur in Form von seitlichen Kiesdepots unterhalb von Kolken am auslaufenden Prallufer angeboten werden, da ansonsten vorhandene Strukturen und Besiedlungen geschädigt werden könnten.
4. Die Position einer Furt befindet sich idealerweise direkt unterhalb einer Laufkrümmung. Gefällereiche Abschnitte sind zu bevorzugen.
5. Bei langen geraden Strecken in überbreiten Profilen sind vorzugsweise keine im Querprofil symmetrischen Furten anzulegen, sondern asymmetrisch mit einer leicht tieferen seitlichen Rinne, um ein pendelndes Strömungsmuster zu bewirken (wechselseitige Furten). V-förmige Furten bewirken symmetrische Kolke in der Profilmittte und sollten nur ausnahmsweise angelegt werden, falls absolut keine Veränderungen im Uferbereich toleriert werden können.
6. Die Abstände zwischen Furten betragen im Mittel das 5- bis 7-Fache der natürlichen Sohlbreite und das 3- bis 5-Fache der natürlichen bordvollen Breite. Können mehrere Furten auf der überplanten Strecke entstehen, so sind Neuanlage und Kiesdepots im Verhältnis 1:1 oder 1:2 abwechselnd zu kombinieren, um auch die natürliche Entwicklung der Furt-Kolk Sequenzen zu fördern.
7. Die Länge der Furten beträgt etwa das 3- bis 4-Fache der Sohlbreite. Der Scheitelpunkt der Furt wird nach etwa 20 bis 30 % der Länge erreicht, sodass unterhalb die Gefälle-strecke der Furt folgt.
8. Die mittlere Höhe der Furt beträgt etwa 0,1 bis 0,2 m und die maximale Höhe etwa 0,2 bis 0,3 m über der mittleren Sohlage: Unterhalb gelegene Furten sollten oberhalb gelegene nicht einstauen. Um als Forellenlaichplatz zu funktionieren, muss auf der Gefälle-strecke mindestens ein Sohlgefälle von 0,2 % erreicht werden.
9. Die Schichtdicke einer Furt beträgt etwa 0,5 m, bei kleineren Bächen gegebenenfalls weniger. Liegt in dem Gewässer eine starke Tiefenerosion vor, so kann die Furt direkt auf die Sohle aufgebracht werden, da keine bedeutenden Veränderungen der Wasserstände zu erwarten sind. Ansonsten ist vorher eine Schicht der Sohle vorsichtig abzugraben; die Mobilisierung von Feinsedimenten ist dabei zu minimieren.
10. Furten und Kolke sind Ausdruck von natürlichen Sedimentumlagerungen. Hydromorphologische Anpassungen und Verlagerungen der Furt sind zu erwarten. Dagegen kann die überwiegende Verwendung von übermäßigem Korn, das die Stabilitätskriterien erfüllt, zu unnatürlichen Gerinnemorphologien führen, die nur unzureichend die Habitatsprüche von Fischen und wirbellosen Tieren erfüllen.
11. Das Furtmaterial setzt sich bei der Anlage aus gemischten Sand-, Kies- und Steinfractionen zusammen (Tab. 3), wobei zunächst das oberflächlich liegende feinere Material weggeschwemmt wird und sich dabei ein stabileres Sohlen-deckwerk ausbildet und das tiefer liegende feinere Material das Korngerüst der Furt stabilisiert. Vereinzelt größere Steine und Blöcke stabilisieren in der Regel die Furt. In begründeten Fällen können im unteren Bereich der Furt alternativ oder kombiniert Blöcke, Buschkisten mit Reisigfaschinen, grobes Totholz (Wurzelstöcke, ins Ufer eingedrückte, schräg liegende Baumstämme auf der Hälfte der Sohlbreite) oder nicht durchgezogene, versetzte Holzpflöckreihen eingesetzt werden, um einer Verlagerung der Furt entgegenzuwirken.
12. Naturtypisches Ufergehölz ist entscheidend für die Ausbildung und Stabilität von Kolken, sodass Furt-Kolk Sequenzen in Verbindung mit Erlen im (potenziellen) Prallhangbereich zur Ausbildung von Kolken und als Ufersicherung zu setzen sind.
13. Engen- und Seitenkolke lassen sich durch impulsgebende Maßnahmen (Strömungslenker) induzieren.
14. Als Zeitraum für die Anlage von Furten bietet sich der Spätsommer bis Frühherbst an, da die Abflussstände in der Regel niedrig sind und dieser Zeitraum außerhalb der Laichzeiten liegt.

15. Natürliche Furten bilden heterogene, veränderliche Formen als Ausdruck der morphodynamischen Prozesse. Auch neu angelegte Furten werden sich morphologisch verändern. Insbesondere ist bis zur Ausbildung eines Deckwerkes mit einem Verlust der Fein- und Mittelskiesfraktionen zu rechnen; aus diesem Grund ist es sinnvoll, oberhalb Geschiebedepots anzulegen.

Folglich sind Umlagerungen bei dieser Maßnahme zu tolerieren, und es ist sinnvoll, Planung und Umsetzung zu dokumentieren, um aus den anschließend beobachteten Veränderungen das bisherige Verständnis zu verbessern.

5 Zusammenfassung

- (1) Naturnahe Fließgewässer sind durch abwechslungsreiche geomorphologische Formen strukturiert. Zu diesen zählen sogenannte Kolke als Vertiefungen und Furten als Erhöhungen der Sohle. Furten und Kolke entstehen als Folge morphodynamischer Prozesse, bei denen Sedimente bei verschiedenen Abflüssen erodiert, transportiert und wieder abgelagert werden. Furten und Kolke wechseln alternierend in mehr oder weniger regelmäßigen Sequenzen ab, wobei im Mittel der Abstand zwischen zwei Furten oder zwei Kolken auch im Norddeutschen Tiefland etwa dem 5- bis 7-Fachen der Sohlbreite entspricht.
- (2) Furt-Kolk Sequenzen sind grundlegend für eine große Tiefenvariabilität sowie Strömungs- und Substratdiversität, die als Indikatoren der Habitatqualität für Fische und wirbellose Tiere gelten können.
- (3) Tiefere, topographisch mehr oder weniger einheitliche Strecken kommen als sogenannte Glides vor. In morphologisch degradierten Gewässern dominieren Glides die Gerinnemorphologie. In diesen Gewässern ohne Furten und Kolke sind Tiefenvariabilität sowie Strömungs- und häufig auch Substratdiversität reduziert.
- (4) Die morphometrische Charakterisierung von Furt-Kolk Sequenzen erfolgt im Längsprofil entlang des Thalwegs, der die longitudinale Stromlinie der größten Wassertiefen beschreibt. Die Tiefenvariabilität kann empirisch über die Restkolkentiefe und statistisch über die Standardabweichung der Sohlagen gegenüber der linearen Regressions-

geraden berechnet (Metrik MSE) werden. Sandgeprägte Gewässer wiesen signifikant tiefere Restkolke gegenüber kiesgeprägten Gewässern auf.

- (5) Fischbiologische Untersuchungen zeigten Zusammenhänge zwischen geomorphologischen Formen und der Verbreitung von Arten und Altersklassen. Der Schwerpunkt des Vorkommens des Hasels lag bei den Kolken. Die Elritze wurde über alle Formen angetroffen, hatte ihren Verbreitungsschwerpunkt jedoch in den Kolken. Der Gründling präferierte Kolke vor Glides und Furten. Groppe und Schmerle bevorzugten die Furten und hatten in den Glides etwas höhere Dichten als in den Kolken. Die Verteilung der Querder des Fluss- und Bachneunauges sowie des Aals lieferte keine eindeutigen Hinweise auf mögliche Verbreitungsschwerpunkte. Die Ergebnisse für die Verteilung von Forellen waren zwischen den untersuchten Gewässern widersprüchlich, tendenziell scheinen juvenile Forellen Furten zu bevorzugen und große Forellen Kolke.
- (6) In unserer heutigen Landschaft sind natürliche geomorphologische Formen durch den Ausbau der Gewässer vielerorts modifiziert, degradiert oder verschwunden, was ursächlich für die gefährdete Biodiversität von Fließgewässern ist. Da morphologisch durch Ausbau und Unterhaltungsbaggerung veränderte Gewässer des norddeutschen Tieflands aufgrund eines Mangels an Kiesen und Steinen diese Formen zumeist nicht eigendynamisch regenerieren können, werden detaillierte Empfehlungen für Restaurationsmaßnahmen gegeben.

Summary

- (1) The channels of near-natural watercourses are structured by diverse geomorphologic forms, including riverbed deepening referred to as "pools" and elevations called "riffles". Riffles and pools are generated by morphodynamic processes, which erode, transport, and deposit sediments during different river-discharge conditions. They alternate in more or less regular sequences, with the average distance between two riffles or two pools generally ranging between the five- and the seven-fold channel widths.

Tabelle 3

Größenordnungen der prozentualen Kornzusammensetzung einer neu anzulegenden Furt. Ein kleiner Anteil an Grobsanden stabilisiert das tiefere Gefüge und verlangsamt das Eindringen noch feinerer Sedimente, ein kleiner Anteil an Steinen und Blöcken stabilisiert die Deckschicht, der Hauptbestandteil (bis ca. 80 %) der Furt wird durch Kiese gestellt (D50 etwa 20 bis 30 mm). Je nach Gefälle und Stabilitätsanforderungen können die Anteile angepasst werden, jedoch sollten Mittel- und Grobkies die dominanten Fraktionen stellen. Der Untergrund und tiefere Kopfbereiche der Furt können zur Stabilisierung auch aus gröberem Korn bestehen.

Proposed percentages of the grain-size composition for newly constructed riffles. A small portion of coarse sand stabilizes the deeper bed structure and reduces the intrusion of finer sediments. A small portion of stones and boulders stabilizes the armour layer. The main portion (up to 80 %) of the riffle should be gravel (D50 about 20 bis 30 mm). These portions may be adapted to local conditions depending on slope and stability criteria, however, medium and coarse gravel should be the dominant fractions. The underground and the deeper layers of the riffle head may be composed of coarser material to improve stability.

Fraktion	Korndurchmesser (mm)	Anteile (%)
Grobsand	0,63–2	< 10
Feinkies	2–6,3	15
Mittelskies	6,4–20	30
Grobkies	20–63	30
Steine	64–200	15
Blöcke	> 200	einzelne

- (2) Riffle-pool sequences are characteristic for wide variability in channel depth as well as flow and substratum diversity, which can be taken as indicators for habitat quality for fish and macroinvertebrates.
- (3) Deeper and topographically more or less uniform stretches are referred to as "glides". Glides dominate the channel form in morphologically degraded streams. The variability in depth as well as flow diversity and frequently also substrate diversity are reduced due to the absence of riffles and pools.
- (4) The morphometric characterization of riffle-pool sequences follows the channel thalweg, i.e. the longitudinal line connecting the deepest points along the riverbed. The variability in depth can be characterized empirically by the residual pool depths and statistically by the mean square error from a regression line fitted to the thalweg data (metric MSE). Sand-dominated streams had significantly deeper residual pools than the gravel-dominated ones.
- (5) Fishbiological investigations revealed relationships between the spatial distribution of certain fish species and geomorphic forms. Dace occurred mainly in pools, and minnow was found in each geomorphic form, although higher densities were recorded in pools. The occurrence of gudgeon decreased in density from pools to glides to riffles. Bullhead and stone loach preferred riffles and had slightly higher densities in glides than in pools. The distribution patterns of eel and the larvae of brook lamprey and river lamprey did not reveal any obvious preferences for certain geomorphic forms. The findings regarding the distribution patterns of brook and sea trout were inconsistent. Juvenile trout tend to prefer riffles while larger trout tend to prefer pools. However, it is likely that density-dependent intra-specific processes affect the distribution of age classes.
- (6) In the present-day landscapes, these fluvial forms have disappeared owing to river engineering and maintenance works. The resulting morphological degradation of watercourses severely endangers aquatic biodiversity. The modified lowland streams and rivers are mostly depleted of gravel and stones and will therefore not be able to restore morphological forms by natural processes. That is why the paper gives detailed recommendations for restoration measures that mimic natural forms to initiate morphodynamic processes.

Anschriften der Verfasser:

Dr. M. Brunke
Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und
ländliche Räume (LLUR)
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
matthias.brunke@llur.landsh.de

M. Purps
Landessportfischerverband Schleswig-Holstein e. V.
Papenkamp 52, 24114 Kiel

C. Wirtz
terra4 – Gesellschaft für Geosystemanalyse mbH
Rungestraße 22–24, 10179 Berlin

Literaturverzeichnis

- ARMSTRONG, J.D. & K.H. NISLOW (2006): Critical habitat during the transition from maternal provisioning in freshwater fish, with emphasis on Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*). – *Journal of Zoology* 269, 403–413
- BISSON, P.A., J.L. NIELSEN, R.A. PALMASON & L.E. GROVE (1982): A system of naming habitat types in small streams, with examples of habitat utilization by salmonids during low streamflow. – In: Armantrout B (ed) *Acquisition and Utilization of Aquatic Habitat Inventory Information*. – American Fisheries Society, Bethesda, 62–73
- BISSON, P.A., D.R. MONTGOMERY & J.M. BUFFINGTON (2006): Valley segments, stream reaches, and channel units. – In: *Methods in Stream Ecology*, edited by F.R. Hauer and G.A. Lamberti. – Academic Press/Elsevier, San Diego, CA., 23–49
- BROOKES, A. (1987): The distribution and management of channelized streams in Denmark. – *Regulated Rivers: Research and Management* 1, 3–16
- BRUNKE, M. (1999): Colmation and depth filtration within streambeds: Retention of particles in hyporheic interstices. – *International Review of Hydrobiology* 84, 99–117
- BRUNKE, M. (2008): Hydromorphologische Indikatoren für den ökologischen Zustand der Fischfauna der unteren Forellenregion im norddeutschen Tiefland. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 5, 234–244
- BRUNKE, M. & J. LIETZ (2011): Regenerationsmaßnahmen und der ökologische Zustand der Fließgewässer in Schleswig-Holstein. – In: *Fließgewässer-Renaturierung heute und morgen. EG-Wasserrahmenrichtlinie, Maßnahme und Effizienzkontrolle*. Hrsg. Sonja Jähmig; Daniel Hering; Mario Sommerhäuser. – *Limnologie Aktuell* 13, 189–205
- CHURCH, M. (1992): Channel morphology and typology. – In: *The Rivers Handbook. Hydrological and ecological principles*. Eds. Calow, G. E. Petts. – Blackwell, London, 126–143
- DUSSLING, U. (2009): Handbuch zu fBS. Hilfestellungen und Hinweise zur sachgerechten Anwendung des fischbasierten Bewertungsverfahrens fBS. – *Verband Deutscher Fischereiverwaltungsbeamter und Fischereiwissenschaftler e.V. – AK Fischereiliche Gewässerzustandsüberwachung*, 41 S.
- GERKEN, R. (2006): Wiederansiedlung von Lachs und Meerforelle im oberen Wümmegebiet. – *Naturkundliche Schriftenreihe Stiftung Naturschutz im Landkreis Rotenburg (Wümme)* 3, 157 S.
- GREGORY, K.J., A.M. GURNELL, C.T. HILL & S. TOOTH (1994): Stability of the pool-riffle sequence in changing river channels. – *Regulated Rivers: Research and Management* 9, 35–43
- HARNISCHMACHER, S. & H. ZEPP (2003): Fluviomorphologische Untersuchungen als Planungshilfen für die Renaturierung kleiner Fließgewässer. – *Wasser & Boden* 55/6, 23–32
- INGENDAHL, D. (2001): Dissolved oxygen concentration and emergence of sea trout fry from natural redds in tributaries of the River Rhine. – *Journal of Fish Biology* 58, 325–341
- IVERSEN, T.M., B. KRONVANG, B.L. MADSEN, P. MARKMANN & M.B. NIELSEN (1993): Re-establishment of Danish streams: resto-

- ration and maintenance measures. – *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 3, 73–92
- JUNGWIRTH, M., G. HAIDVOGL, O. MOOG, S. MUHAR & S. SCHMUTZ (2003): *Angewandte Fischökologie in Fließgewässern*. – *Facultas UTB, Wien*, 547 S.
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) (2000): *Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland – Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer*. – *Kulturbuchverlag, Berlin*
- LEOPOLD, L.B., M.G. WOLMAN & J.P. MILLER (1964, reprinted in 1992): *Fluvial processes in geomorphology*. – *W.H. Freeman and Company, San Francisco*, 522
- LISLE, T.E. (1989): *Sediment Transport and Resulting Deposition in Spawning Gravels, North Coastal California*. – *Water Resources Research* 25, 1303–1319
- LISLE, T.E. (1987): Using “residual depths” to monitor pool depths independently from discharge. – *USDA Forest Service Research Note PSW-394*
- MOSSOP, B. & M.J. BRADFORD (2006): Using thalweg profiling to assess and monitor juvenile salmon (*Oncorhynchus* spp.) habitat in small streams. – *Canadian Journal for Fisheries and Aquatic Sciences* 63, 1515–1525
- MUNLV (2006) (Hrsg.): *Leitfaden zur wasserwirtschaftlich-ökologischen Sanierung von Salmonidenlaichgewässern in NRW*. 168 S.
- PEDERSEN, M.L., E.A. KRISTENSEN, B. KRONVANG & H. THODSEN (2009): Ecological effects of re-introduction of salmonid spawning gravel in lowland Danish streams. – *River Research and Application* 25, 626–638
- PRETTY, J.L., S.S.C. HARRISON, D.J. SHEPHERD, C. SMITH, A.G. HILDREW & R.D. HEY (2003): River rehabilitation and fish populations: assessing the benefit of instream structures. – *J. Appl. Ecol.* 40, 251–265
- RONI, P., K. HANSON & T.J. BEECHIE (2008): Global review of the physical and biological effectiveness of stream habitat rehabilitation techniques. – *North American Journal of Fisheries Management* 28, 856–890
- ROUSSEL, J.-M. & A. BARDONNET (1997): Diel and seasonal patterns of habitat use by fish in a natural salmonid brook: an approach to the functional role of the riffle-pool sequence. – *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 346, 573–588
- SCHAARSCHMIDT, T., H.H. ARZBACH, R. BOCK, I. BORKMANN, U. BRÄMICK, M. BRUNKE, R. LEMCKE, M. KÄMMEREIT, L. MEYER & L. TAPPENBECK (2005): *Die Fischfauna der kleinen Fließgewässer Nord- und Nordostdeutschlands – Leitbildentwicklung und typgerechte Anpassung des Bewertungsschemas nach EU-Wasserrahmenrichtlinie*. – *LAWA-Projekt im Rahmen des Länderfinanzprogramms Wasser und Boden. Abschlussbericht*. 330 S.
- SCHERLE, J. (1999): *Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen. Grundlagen, Leitbilder, Planung*. – *Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe H.* 199
- SEAR, D.A. & M.D. NEWSON (2004): The hydraulic impact and performance of a lowland rehabilitation scheme based on pool-riffle installation: the River Waveney, Scole, Suffolk, UK. – *River Research and Application* 20, 847–863
- SEAR, D.A., M.D. NEWSON & C.R. THORNE (2003): *Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology*. – *R&D Technical Report FD1914. Defra/Environment Agency. Flood and Coastal Defence R&D Programme*. 233 S.
- STEWART, G.B., H.R. BAYLISS, D.A. SHOWLER, W.J. SUTHERLAND & A.S. PULLIN (2009): Effectiveness of engineered in-stream structure mitigation measures to increase salmonid abundance: a systematic review. – *Ecological Applications* 19, 931–941