

## Die Möhne und ihre Zuflüsse:

### Ein Leitfaden über ihre Naturgeschichte mit Hinweisen zur Renaturierung

Eine Studie im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Dezernat für Wasserwirtschaft und Gewässerschutz.



Die Möhne unterhalb von Belecke.

Bearbeiter:

Dr. Margret Bunzel-Drüke, Joachim Drüke, Roland Loerbroks & Olaf Zimball

Arbeitsgemeinschaft Biologischer Umweltschutz im Kreis Soest e.V.

Biologische Station Soest

Teichstraße 19

59505 Bad Sassendorf-Lohne

Bad Sassendorf-Lohne, November 2020



Biologische Station Soest

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	3
<b>2</b>	<b>Sedimenthaushalt und Morphologie von Fließgewässern in Mittelwestfalen – Gewässergeschichte seit der letzten Eiszeit unter besonderer Berücksichtigung des Möhnesystems</b> .....	4
2.1	Definitionen.....	4
2.2	Mineralische Sohlsubstrate und ihre Entstehung .....	5
2.3	Verflochtene Flüsse.....	9
2.4	Fluss-Metamorphosen am Beginn des Holozäns .....	9
2.5	Auelehm .....	10
2.6	Verzweigende und anastomosierende Flüsse im Holozän.....	13
2.7	Einbett-Flüsse .....	16
2.8	Einfluss des Bibers auf die Morphologie von Bächen .....	18
2.8.1	Ort des Biber-Einflusses .....	18
2.8.2	Morphologie von Bächen der Forellenregion unter dem Einfluss des Bibers .....	22
2.8.3	Biber und Fische .....	25
2.9	Anthropogene Einflüsse auf den Kieshaushalt von Fließgewässern des Sauerlands ab dem Mittelalter .....	25
2.10	Grundeisbildung als Problem gering mächtiger Kiesschichten .....	29
2.11	Kurze Geschichte der Gewässer des Möhne-Einzugsgebietes.....	31
2.12	Typologie .....	37
2.13	Kernaussagen zum Verständnis von kiesführenden Gewässern des Mittelgebirges ....	38
<b>3</b>	<b>Eigenschaften kiesgeprägter Gewässer des Mittelgebirges</b> .....	39
3.1	Anordnung des Kiesel im Längsverlauf der Gewässer.....	39
3.2	Interstitial .....	40
3.3	Einfluss von Totholz.....	40
3.4	Lithophile Fische und Rundmäuler in den Gewässern des Rheinischen Schiefergebirges .....	43
3.4.1	Überblick über die Arten und ihre Biologie.....	43
3.4.2	Kolmation von Kiesbänken.....	46
3.4.3	Folgen des Kiesaustrags für Fische und Rundmäuler .....	48
<b>4</b>	<b>Hinweise und Anregungen für die Renaturierungspraxis</b> .....	49
4.1	Allgemeines .....	49
4.2	Umgang mit Leitbildern.....	50
4.4	Konkretisierung der Leitbilder für die Projektregion .....	52
4.4	Der Planungsprozess .....	61
4.5	Renaturierung durch Hochwasser.....	62
4.6	Erkundung der geologischen und bodenkundlichen Situation .....	64
4.7	Auen der Talauebäche und der Möhne .....	65
4.8	Ersatzaunen .....	66
4.9	Umgang mit Auelehm bei Neutrassierung .....	67
4.10	Kieszugabe.....	70
4.11	Mechanische „Kiesreinigung“ .....	70
4.12	Totholz.....	71
<b>5</b>	<b>Literatur</b> .....	72

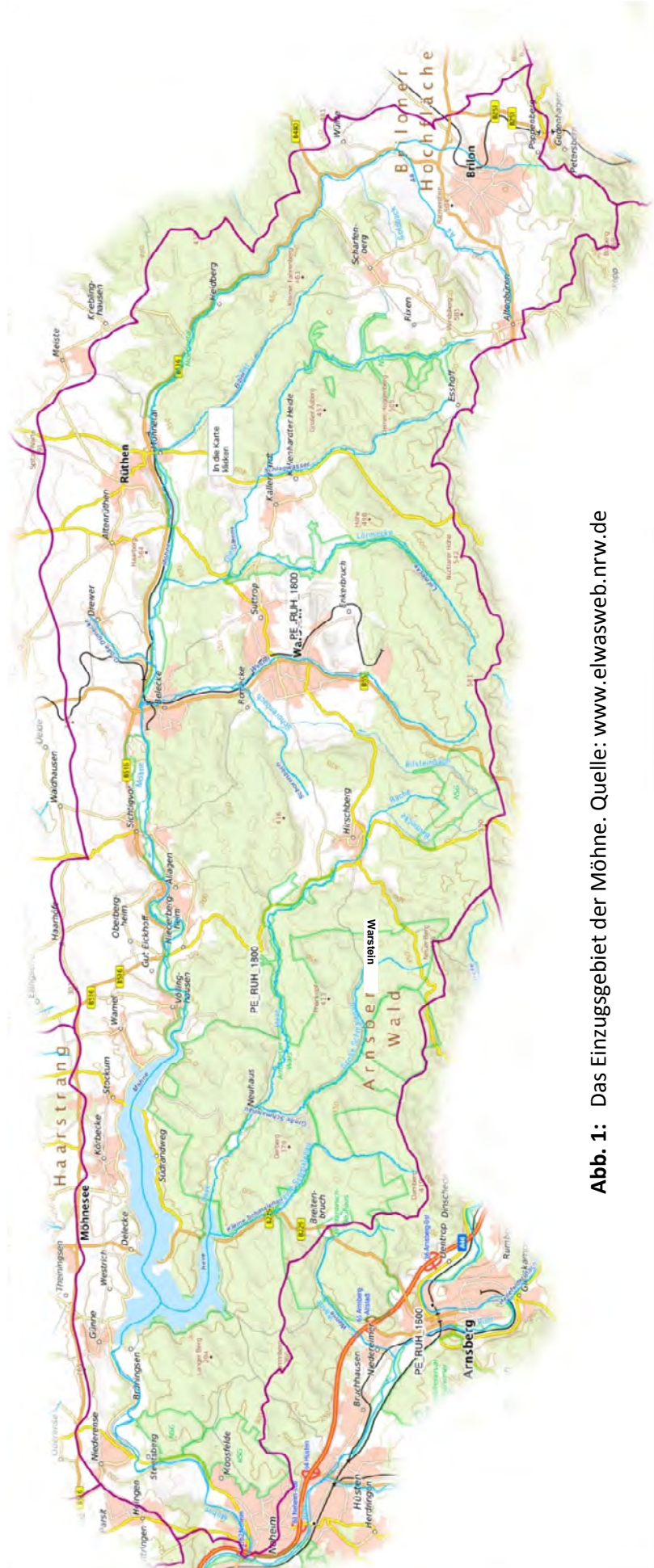


Abb. 1: Das Einzugsgebiet der Möhne. Quelle: [www.elwasweb.nrw.de](http://www.elwasweb.nrw.de)

## 1 Einführung

Kies ist in Nordrhein-Westfalen ein weit verbreitetes Substrat in Bächen, Flüssen und ihren Auen. Es erscheint selbstverständlich vorhanden und kaum eines weiteren Gedankens wert. Erst wenn der Kieshaushalt gestört ist oder ein naturfernes Gewässer renaturiert werden soll, widmet man dem Geschiebe mehr Aufmerksamkeit.

Die vorliegende Broschüre will Informationen zum Kies, seiner Herkunft, seiner Bedeutung für Fließgewässer und ihre Lebensgemeinschaften sowie Gedanken zur Behandlung dieses Substrates bei Renaturierungsmaßnahmen geben. Im Fokus stehen die Gewässertypen des Süderberglandes – also Fließgewässer der Forellen- und Äschenregion in Sauerland, Siegerland, Wittgensteiner Land und Eifel.

Unsere Beschäftigung mit dem Kies hat ihren Ursprung in verschiedenen Projekten im Einzugsgebiet der Ruhr, überwiegend im Flussgebiet der Möhne, aber die meisten Betrachtungen treffen auch auf andere kiesführende Mittelgebirgsbäche zu, z.T. auch auf kiesgeprägte Flüsse der Barbenregion.

Recht schnell stellten wir fest, dass uns viele grundlegende Fakten unbekannt waren: Welche typischen Sedimente treten in Fließgewässern in Mittelwestfalen auf, woher stammen sie, wann entstanden sie, wie beeinflussen sie die Gestalt der Fließgewässer und schließlich die Besiedlung durch Fische und andere Arten? Bei der Frage nach dem Naturzustand der Bäche wurde ein Blick in ihre Vergangenheit unumgänglich: Plötzlich war die Landwirtschaft im Mittelalter und die ursprüngliche Verbreitung des Bibers wichtig.

Die Broschüre gliedert sich in drei Teile: Zunächst gibt sie einen Überblick über Sedimenthaushalt und Entwicklung der Gewässermorphologie über die Zeit inklusive der Folgen grundlegender menschlicher Eingriffe. Danach wird die Anordnung des Kieses im Gewässerbett und seine Bedeutung für lithophile Fische, Rundmäuler und andere Arten kurz geschildert. Der letzte Teil beschäftigt sich mit Hinweisen, die bei der Renaturierung von kiesgeprägten Bächen hilfreich sein können.

## 2 Sedimenthaushalt und Morphologie von Fließgewässern in Mittelwestfalen - Gewässergeschichte seit der letzten Eiszeit unter besonderer Berücksichtigung des Möhnesystems

### 2.1 Definitionen

Zu Beginn sind zum Verständnis einige Erklärungen und Definitionen erforderlich. Da ein wesentlicher Teil der relevanten Literatur englischsprachig ist, werden für die eindeutige Benennung wichtiger Begriffe - und ggf. zum Nachlesen in den Originalarbeiten – auch die englischen Namen angegeben.

Verschiedene Umweltbedingungen führen zur Ausbildung unterschiedlicher Morphologietypen von Flüssen (fluvial styles, planforms). Wesentlich sind z.B. Talgefälle (gradient), Abfluss (discharge), Art und Menge des Geschiebes (bedload) und Vegetation. Die Wirkungen einiger Parameter sind gut erforscht, die Einflüsse anderer und vor allem die Wechselwirkungen untereinander noch teilweise unverstanden.

Erschwerend kommt hinzu, dass die Begriffe für Morphologietypen weder auf Deutsch noch im englischsprachigen Raum einheitlich sind. Einige Begriffe wurden (und werden) synonym für mehrere Typen verwendet, außerdem unterscheiden sich selbst aktuelle Definitionen verschiedener Autoren für denselben Typ voneinander.

Eine Unterscheidung erfolgt oft nach der Laufentwicklung (Linienführung, Laufkrümmung, Windungsgrad) (channel sinuosity), wobei eigentlich nur ein Einbettgerinne oder ein Arm eines Mehrbettgerinnes gemeint sein kann, was meist aber nicht explizit gesagt wird. Ein Gewässer(arm) ist:

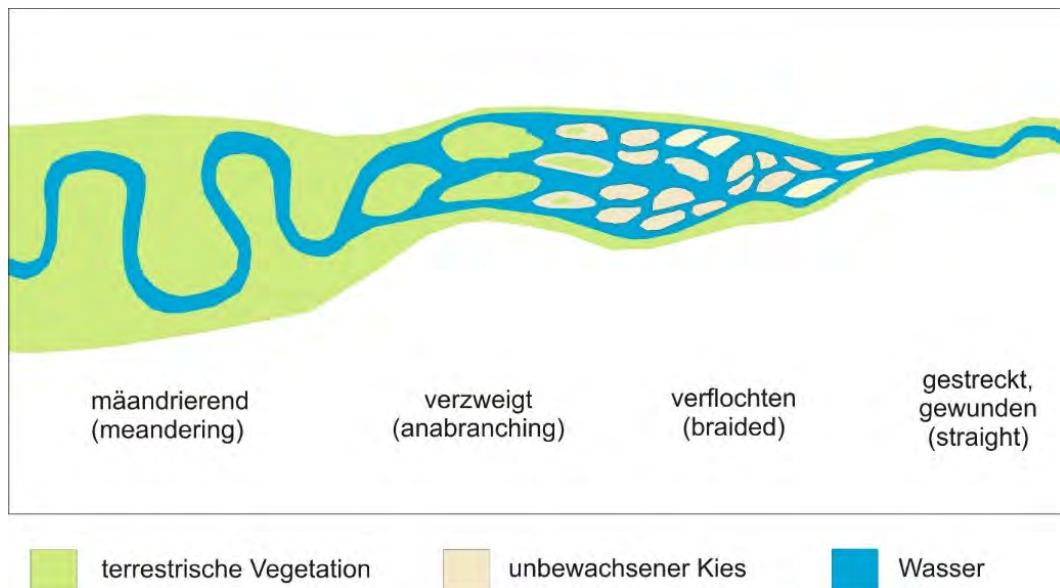
- gestreckt (straight),
- gewunden (keine englischsprachige Entsprechung, hier wird nur zwischen straight und meandering differenziert),
- mäandrierend (meandering).

Beim Gerinnemuster (Laufform; fluvial style, planform) bzw. der Anzahl paralleler Arme (channel multiplicity) lassen sich unterscheiden:

- Einbettgerinne (one channel river)
  - gestreckt (straight)
  - mäandrierend (meandering)
- Mehrbettgerinne (multiple channel river)
  - verflochtener Fluss, Wildfluss, „verwilderter“ Fluss (braided river)
  - verzweigter oder verzweigender Fluss (anabranching river) als Oberbegriff mit dem anastomosierenden Fluss (anastomosing river) als Sonderform des verzweigten Flusses (s. NANSON & KNIGHTON 1996, MAKASKE et al. 2017; allerdings unterscheiden einige Autoren „anabranching“ und „anastomosing“ nicht, sondern benutzen die Begriffe synonym).

Die Arme eines verzweigten Flusses können also sowohl gestreckt als auch mäandrierend sein (s. MAKASKE 2005).

In der englischsprachigen Literatur finden sich vereinfacht oft nur die Kategorien braided river, ana-branching river und meandering river (gemeint ist mit letzterem Begriff ein Einbettgerinne).



**Abb. 2:** Schema zur Klassifizierung alluvialer Flusstypen nach ihrer Laufform (channel pattern, river planform) (nach SCHUMM 1981, MAKASKE 2005, WOHL 2015)

Morphologietypen folgen in Mitteleuropa räumlich meist nach einem festen Muster aufeinander: Von der Quelle im Gebirge bis zum Beginn des Mündungsdeltas findet man typischerweise zunächst ein gestrecktes Einbettgerinne, dann ein verflochtenes Mehrbettgerinne und schließlich ein gewundenes oder mäandrierendes Einbettgerinne. Nach KERN (1994) können Flussverzweigungen (anabranching) als eine Zwischenform zwischen Wildflüssen und gewundenen Flüssen (Einbettgerinne) angesehen werden.

Zeitlich sind Morphologietypen an einem bestimmten Gewässerabschnitt nicht stabil, sondern ändern sich z.B. durch Klimawandel oder menschliche Eingriffe. Es gibt Schwellen für die Umwandlung eines Morphologietyps in einen anderen, was Fluss-Metamorphose (river metamorphosis) genannt wird, eine fast vollständige Transformation der Flussmorphologie in relativ kurzer Zeit (vgl. SCHUMM 1969). Da jedoch stets viele Faktoren beteiligt sind, bestehen erhebliche Unterschiede zwischen Gewässern desselben Morphologietyps, wann und unter welchen Bedingungen eine Verwandlung erfolgt.

Vom letzten Glazial zur Gegenwart änderten viele Flüsse Mitteleuropas ihr Aussehen, dabei war die Reihenfolge der Morphologietypen offenbar wie im Längsverlauf eines Gewässers: ein verflochtenes Mehrbettgerinne, ein verzweigtes Mehrbettgerinne und ein mäandrierendes Einbettgerinne.

Für die Zuordnung eines Gewässers zu einem Typ ist schließlich zu bedenken, dass eine Fluss-Metamorphose zwar in geologischen Zeiten schnell verläuft, aber dennoch viele Hundert Jahre dauern kann. Notgedrungen gibt es deshalb viele zeitliche und räumliche Übergangsformen zwischen den beschriebenen Morphologietypen.

## 2.2 Mineralische Sohlsubstrate und ihre Entstehung

In unterschiedlichem Umfang besitzen Fließgewässer auf ihrer Sohle nicht verfestigte mineralische Substrate, die allmählich mit der fließenden Welle abwärts transportiert werden; selten besteht die Gewässersohle aus gewachsenem Fels oder aus organischen Stoffen wie Torf ohne Überdeckung von Kies (gravel), Sand (sand), Schluff (silt) oder Ton (clay). Die letztgenannten Bezeichnungen für Locker"gesteine" beziehen sich nur auf die durchschnittliche Korngröße der

Bestandteile, nicht auf ihre chemische Zusammensetzung. Als Kies gelten gerundete Steine von 63 bis 2 mm Durchmesser, als Sand Steine von 2 bis 0,063 mm Durchmesser; Schluff und Ton sind noch feiner, ihre Bestandteile lassen sich mit dem bloßen Auge nicht mehr trennen. Gemische aus feinem Sand, Schluff und Ton werden als Lehm (loam) bezeichnet. In starker Strömung bewegen sich Kies und grober Sand am Gewässerboden und heißen dann in der Wasserwirtschaft „Geschiebe“ (bed load). Die feineren Fraktionen werden als Suspension in der Wassersäule bewegt (suspended load); sie verursachen die Trübung bei Hochwasser.

Der Begriff „Schotter“ (grit, broken stone, crushed stone) wird teilweise synonym mit „Kies“ verwendet, bezeichnet aber im Bauwesen künstlich gebrochene, kantige Steine. Zur Vermeidung von Missverständnissen wird der Begriff „Schotter“ nachfolgend vermieden.

Woher stammen die Sedimente im Gewässer? Außerhalb der Hochgebirge entstehen sie v.a. während der Kaltzeiten (Glaziale) durch Frostsprengungen, Eisschurf und andere Verwitterung von freiliegendem Gestein im überwiegend eisfreien Gletschervorland, in Westfalen v.a. im Mittelgebirge (Rheinisches Schiefergebirge) und auf dem Haarstrang. Ein Gemenge von Partikeln unterschiedlicher Größe bleibt am Ort der Entstehung liegen oder rutscht durch Solifluktion beim Auftauen des Permafrostbodens allmählich die Hänge herunter. Die zunächst kantigen Steine und Steinchen werden von Schmelzwasser weiter talabwärts transportiert; auf dem Weg runden die anfangs scharfen Kanten ab. Fließgewässer sortieren das Material: Die größten Steine bleiben oben liegen, die feinsten Partikel werden am weitesten transportiert, wodurch die Abfolge Kies – Sand – Schluff – Ton entsteht. In Gletschernähe wird die von den Feinsedimenten verursachte Trübung „Gletschermilch“ genannt.



**Abb. 3:** linkes Bild: Maximale Ausdehnung der Gletscher in der letzten Kaltzeit (Weichsel) und der vorletzten (Saale). Kartengrundlage von wikimedia ([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Relief\\_Map\\_of\\_Germany.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Relief_Map_of_Germany.png)), Lage der Eisränder nach MESCHÉDE (2015)

rechtes Bild: Erster - und gleichzeitig weitester - Eisvorstoß der Saale-Kaltzeit: Das Möhne-Einzugsgebiet war eisfrei. (Kartengrundlage von wikimedia ([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a6/North\\_Rhine-Westphalia\\_topographic\\_map\\_01.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a6/North_Rhine-Westphalia_topographic_map_01.jpg)), Lage des Gletscherrandes nach SKUPIN et al. (1993)



**Abb. 4:** Geröll und Kies entstehen v.a. durch Frostsprengungen von bloß liegendem Gestein – während der Kaltzeiten im eisfreien Gletschervorland, während der Warmzeiten nur im Hochgebirge. In Nordrhein-Westfalen entsteht Kies derzeit praktisch nicht neu.

In Kaltzeiten zeigten die meisten Flüsse Mittelwestfalens einen ähnlichen Abflussgang wie noch heute arktische Flüsse oder Gletscherflüsse: In den eisigen Wintern herrschte Niedrigwasser, im Sommer stieg der Pegel stark durch Schmelzwasser und in geringerem Maße durch Niederschläge, die einen wesentlich geringeren Umfang hatten als in Interglazialen. Im Winter war das Wasser klar, im Sommer getrübt.

In Mittelwestfalen ist Kies die schwerste Fraktion des Geschiebes. Da während der Kaltzeiten die Abflüsse relativ gering waren und die Zufuhr von Material sehr groß, verblieb viel Kies in den Flussaunen des Mittelgebirges und seiner Vorländer. Mächtige Ansammlungen konnten an Knicks des Talgefälles, an plötzlichen Verbreiterungen von Tälern oder an den Mündungen von Seitentälern entstehen.

So erklären sich die weichsel- und eventuell saalezeitlichen Ansammlungen von Plänerkies in Mächtigkeiten von 12 – 19 m am Fuß des Haarstrangs zwischen Erwitte-Stirpe und Geseke (SKUPIN 1995, 2002, 2004) durch den Übergang von der steileren Haar zur flacher geneigten Hellwegebene

(s. BUNZEL-DRÜKE & ZIMBALL 2016): Dort ließ die Transportkraft des Wassers wegen der Gefältereduktion nach, und der Kies blieb liegen. Ähnliche Vorgänge führten im Möhne-Einzugsgebiet in der Weichsel-Kaltzeit lokal zur Ablagerung größerer Kiesmengen: „Im unteren Glennetal, kurz vor der Einmündung in das Möhnetal, schwillt der Schotterkörper örtlich auf 2,2 m an. Ähnlich große Mächtigkeiten lieferte das zwischen Kallenhardter Heide und Sutlindenkopf sehr breite Tal der Schlagwasser.“ (CLAUSEN & LEUTERITZ 1984).



Der Kies in Möhne und Heve (Abb. 5) setzt sich v.a. aus Ton-, Schluff- und Sandsteinen sowie Kiesel- und Alaunschiefern des Ober- und Unterkarbons zusammen (CLAUSEN 1984, CLAUSEN & LEUTERITZ 1984).



**Abb. 5:** Kies aus der Möhne

Im Mittelwestfalen wird derzeit kein Kies gebildet bzw. der Umfang der Neubildung ist so extrem gering, dass er vernachlässigt werden kann (z.B. CLAUSEN 1984, CLAUSEN & LEUTERITZ 1984). Das heute vorhandene Geschiebe der Bäche und Flüsse ist also eiszeitlichen Ursprungs. Geht es verloren, kann es erst in der nächsten Kaltzeit nachgeliefert werden.

Wird das Gefälle und damit die Transportkraft eines Fließgewässers im Flach- und Tiefland geringer, bleibt nach dem Kies zunächst der grobe und dann der feine Sand liegen. So entstanden die sandigen Ebenen z.B. des Münsterlandes. Da während der Kaltzeiten in den Flussauen und in der Nähe der Inlandgletscher große Flächen vegetationslos waren, wurde der Sand auch äolisch verfrachtet, wodurch entlang eiszeitlicher Uferwälle z.B. an Lippe und Ems Binnendünen entstanden.

Lehm als Mischung aus Gesteins-Bestandteilen verschiedener Korngrößen mit darin enthaltenen größeren Steinen verblieb teilweise am Ort seiner Entstehung. Noch heute liegt er als Decke (Hochflächenlehm) über den Gesteinen der meisten Mittelgebirge. Bewegt er sich v.a. in Glazialen talabwärts, wird er Hanglehm (hill loam, slope loam) genannt. Vom Wasser transportiert und auf dem Talboden abgelagert heißt er Auelehm (highflood loam, alluvial loam, alluvial clay), vom Wind verfrachtet ist es Löss (loess). Löss sammelte sich im Lee von Mittelgebirgen während der Kaltzeiten an. Es handelt sich dabei überwiegend um von Gletschern fein zermahlene Gesteinsstaub, der bei einem Fehlen der Vegetationsdecke von den trockenen, kalten Fallwinden an den Gletschern sowie den in Mitteleuropa vorherrschenden Nordwest- und Westwinden transportiert wurde. In der Hellweg-Ebene zwischen Soest und Salzkotten erreicht der Löss aus dem Hochglazial der Weichsel-Kaltzeit eine Mächtigkeit von durchschnittlich 1 – 3 m (SKUPIN 1991); im Sauerland ist Löss relativ selten, meist mit Hang- und Hochflächenlehm vermischt (CLAUSEN 1984, CLAUSEN & LEUTERITZ 1984).

### 2.3 Verflochtene Flüsse

Während der Kaltzeiten und zu Beginn des Holozäns waren viele kies- und sandführende Gewässer wie Lippe und Ruhr in Mittelwestfalen mehrarmige, sich oft verändernde Gerinne mit zahlreichen aus dem Wasser ragenden Sedimentbänken (bars) in Form von wenig dauerhaften Inseln („Wildflüsse“, „verwilderte Flüsse“, „verflochtene Flüsse“ oder braided rivers). Die Inseln oder Sedimentbänke waren – verglichen mit Flüssen anderer Morphologie-Typen - relativ klein und konvex geformt (MAKASKE 2001). In Jahreszeiten mit niedrigem Abfluss waren die Auen dieser Flüsse Kies- oder auch Sandebenen mit Gewässerarmen, deren Sohlen nur wenig unter dem Niveau der Umgebung lagen; in abflussreichen Zeiten floss das Wasser in der gesamten Aue, so dass die Sedimentinseln überschwemmt waren.

Nach KNIGHTON 1998, ergänzt von WOHL (2014), ist das „braiding“ eines Flusses oft mit vier Bedingungen verbunden, von denen allerdings keine allein ausreichend oder auch nur notwendig für die Ausbildung eines verflochtenen Bettes ist:

- große Geschiebemengen verbunden mit kleinem Transportvermögen des Gewässers,
- Ufer aus leicht erodierbarem Material (z.B. Kies, Sand, aber kein kohäsives Sediment wie Schluff),
- schnelle Wechsel der Abflussmenge,
- steiles Talgefälle bzw. hohe Flussleistung (stream power;  $\Omega = \gamma \times Q \times S$  mit  $\gamma$  = spezifisches Gewicht von Wasser,  $Q$  = Abfluss,  $S$  = Sohlgefälle).

Wie die genannten Bedingungen bei der Aufrechterhaltung des verflochtenen Morphologietyps zusammenspielen, ist noch nicht abschließend erforscht. Klar ist jedoch, dass Wildflüsse unterschiedlich weit von einem „Wendepunkt“ entfernt sind, an dem eine Metamorphose zu einem anderen Flusstyp einsetzt. So gehörten während der Kaltzeiten auch Gewässer mit geringem Talgefälle wie der Niederrhein zu den verflochtenen Flüssen (s. ERKENS 2009), während in Warmzeiten Wildflüsse nur bei höherem Talgefälle auftreten.

### 2.4 Fluss-Metamorphosen am Beginn des Holozäns

Zu Beginn von Warmzeiten wie dem Holozän stieg die Temperatur relativ rasant an. Das förderte die Vegetation, und zuvor offene Flächen wuchsen rasch zu. Außerdem wurde das in den Eispanzern gebundene Wasser frei, Niederschläge nahmen zu und die Abflüsse der Fließgewässer erhöhten sich, wurden aber im Jahresverlauf gleichmäßiger. Auch große Hochwasser wurden wieder häufiger, und kaltzeitliche Sedimente wie Kies und Sand wurden in größerem Umfang als zuvor abwärts transportiert. In Auen mit geringem Gefälle legte der aufkommende Bewuchs die zuvor vegetationsfreien Kies- und Sandflächen von verflochtenen Flüssen fest. Einige Bäche und Flüsse begannen daraufhin, sich in die Talböden einzuschneiden.

Die neuen Umweltbedingungen führten zu Fluss-Metamorphosen, das ist eine fast vollständige Transformation der Flussmorphologie in relativ kurzer Zeit (vgl. SCHUMM 1969).

Nach ERKENS (2009) ging der Niederrhein zu Beginn des Holozäns allmählich von einem „verwilderten“ Fluss (braided river) zu einem mäandrierenden Fluss mit Einbettgerinne über. Dabei verlief das Einschneiden in die pleistozäne Niederterrasse relativ schnell, während die Kontraktion der verzweigten Arme zu nur noch einem Flussbett mehrere Jahrtausende dauerte. In dieser Übergangszeit war der Niederrhein in vielen Abschnitten ein Fluss mit mehreren relativ stabilen Armen, also ein verzweigter oder verzweigender Fluss (anabranching river, s.u.). Diese Verwandlung des Niederrheins war nicht anthropogen beeinflusst.

In der oberen Mittelweser – unterhalb von Porta Westfalica, wo der Fluss das Mittelgebirge verlässt - erfolgte die Umstellung des verwilderten Gerinnebettmusters zum mäandrierenden schon in der späten Weichsel-Eiszeit über die Zwischenstufe eines verzweigten Flusses. Auslöser der Metamorphose war die Klimaerwärmung in dem nur knapp 700 Jahre dauernden Alleröd-Interstadial um 11000 v.Chr. In der folgenden, rund 3000 Jahre dauernden Erosionsphase wurde die Weseraue um 6 – 7 m tiefer gelegt (CASPER 1993).

Die Ober- und Mittelläufe anderer Flüsse auch in der Ebene (z.B. Lippe, Ruhr) blieben aber zunächst Kies- bzw. Sand-geprägte verflochtene Wildflüsse.

Eine geomorphologische Untersuchung von KASIELKE (2017) der Ruhr im Füchtener Bogen an der Kreisgrenze Soest / Hochsauerland ergab, dass die Ruhr an dieser Stelle bis etwa zum Jahr 1200 AD ein verwilderten Fluss aus zahlreichen Gerinnen und dazwischen liegenden Kiesbänken verschiedener Größe war. *„Bei Hochwasser nahm die Ruhr weite Teile des von Schottern bedeckten Talbodens ein. Das verwilderte Hochwasserbett bestand aus größeren und tieferen Hauptgerinnen, die auch bei Niedrigwasser durchflossen wurden, und zahlreichen kleineren Nebengerinnen, die zusammen ein verwildertes, höchst dynamisches System formten, in dem sich regelmäßig neue Gerinne bildeten und Kiesbänke aufgeschottert wurden, während ältere Gerinne verlandeten.“* Als Bedingungen für Entstehung und Aufrechterhaltung des verflochtenen Zustands der Ruhr nennt KASIELKE (2017):

- grobes Sediment (Kies) in ausreichender Menge: noch heute sind mehrere Meter mächtige Kiesschichten der Niederterrasse in der Ruhraue erhalten;
- wenig kohäsives Feinmaterial (Lehm, Ton) in der Aue: solche Sedimente fehlten bei den Transektstudien in den Ablagerungen der tiefen Schichten in der Ruhraue weitgehend;
- eine hohe Flussleistung (Produkt aus Abfluss und Gefälle): die Ruhr fällt mit ihren Werten gerade noch in den Bereich der verwilderten Flüsse.

## 2.5 Auelehm

Der Beginn der Landwirtschaft veränderte auch die Fließgewässer. Vor rund 7500 Jahren (um 5500 v.Chr.) wanderten erste Ackerbauer in Westfalen ein und ließen sich auf den fruchtbarsten Böden nieder (TERBERGER & GRONENBORN 2014), etwa in Löss-Landschaften wie der Soester Börde. Im Spätneolithikum ab ca. 6300 BP nahm die Waldrodung zur Schaffung landwirtschaftlicher Flächen zu, außerdem verstärkte sich der menschliche Einfluss durch die Erfindung des Pflugs (KALIS et al. 2003).

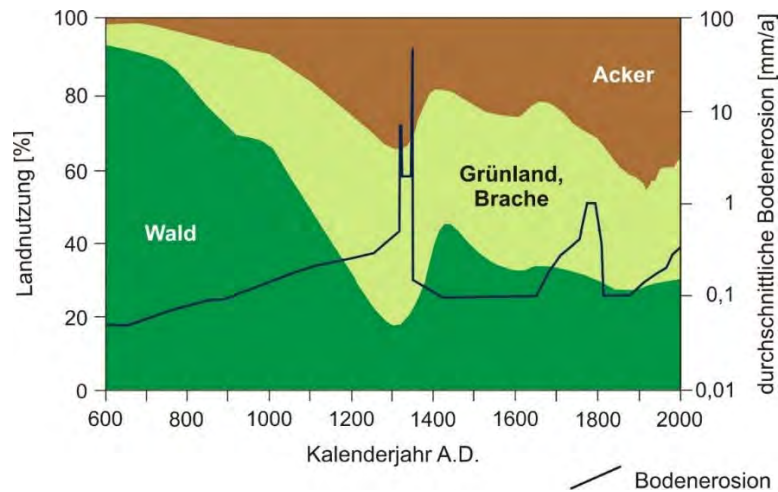
Niederschläge spülten Feinsedimente von den zeitweise vegetationsfreien Äckern. Schon bei kleineren Hochwassern färbte sich das Wasser lehmfarben, wie zuvor nur bei sehr großen Fluten. An strömungsarmen Stellen in der überfluteten Aue setzten sich die mitgeführten Feinsedimente ab, füllten Mulden und nicht durchflossene Seitenarme auf. Auch dichte Vegetation vermindert die Fließgeschwindigkeit und „kämmt“ damit den Auelehm (highflood loam, alluvial clay) aus.



**Abb. 6:** Auch heute noch geht die Ablagerung des Auelehms weiter – hier ein Foto aus der Aue der Möhne aus dem April 2019.

Mit dem Beginn der Landwirtschaft setzte eine starke Ablagerung von Auelehm in den Tälern ein. Im Flachland (Soester Börde) war das vor etwa 7500 Jahren, im Mittelgebirge (Sauerland) erst im frühen Mittelalter, also vor ca. 1000 Jahren (vgl. KASIELKE 2017).

Im 14. Jahrhundert war in Deutschland der Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche und Ackerbrache mit rund 80 % so hoch wie nie zuvor oder danach. In Kombination mit Extremniederschlägen kam es dadurch in diesem Zeitraum zu den stärksten bisher dokumentierten Erosionserscheinungen (LANG et al. 2003). Besonders hervorzuheben ist die Magdalenenflut aus dem Juli 1342, die ganze Regionen in Mitteleuropa verwüstete. Dieses Hochwasser, dem eine Jährlichkeit von bis zu 10 000 zugeschrieben wird, ist für einen wesentlichen Teil der Auelehm-Ablagerungen an vielen Flüssen verantwortlich (ZBINDEN 2011). Auch aus Westfalen liegen Hinweise auf die Auswirkungen dieses Ereignisses vor (WIESENDAHL 2015).



**Abb. 7:** Bodenerosion und Landnutzung in Deutschland (ohne Alpen) in den letzten 1400 Jahren (verändert nach LANG et al. 2003): Extremniederschläge im 14. Jahrhundert trafen mit hohen Anteilen von Ackerland und Brache zusammen, was einen starken Bodenverlust zur Folge hatte.

Das kohäsive Feinmaterial aus Sand, Schluff und Ton war ein Faktor, der verwilderte Flüsse mit Eigenschaften im Grenzbereich dieses Morphologietyps zum „Kippen“ in einen anderen Morphologietyp brachte – eine Fluss-Metamorphose.

Auch unter Wasser veränderten die Feinsedimente Habitate, indem sie das Interstitial verstopfen und damit z.B. Laichplätze und Larvallebensräume von Fischen unbrauchbar machen.



**Abb. 8:** Kohäsiver Auehlem überlagert die Kiesschicht, in die sich das Gewässer eingeschnitten hat (Möhne östlich Rüthen).



**Abb. 9:** Auehm kann die seitliche Verlagerung von Gewässern so stark behindern, dass einmal vorhandene Mäander nur noch extrem langsam wandern. Oft beginnt eine laterale Erosion in den weniger kohäsiven Kiesschichten unter dem Lehm, der dann unterspült wird und in Blöcken abbricht (Möhne östlich Belecke).

## 2.6 Verzweigende und anastomosierende Flüsse im Holozän

Die neuen Umweltbedingungen mit einer großen Menge mobilisierter Feinsedimente führten zu einer Fluss-Metamorphose, das ist eine fast vollständige Transformation der Flussmorphologie in relativ kurzer Zeit (vgl. SCHUMM 1969).

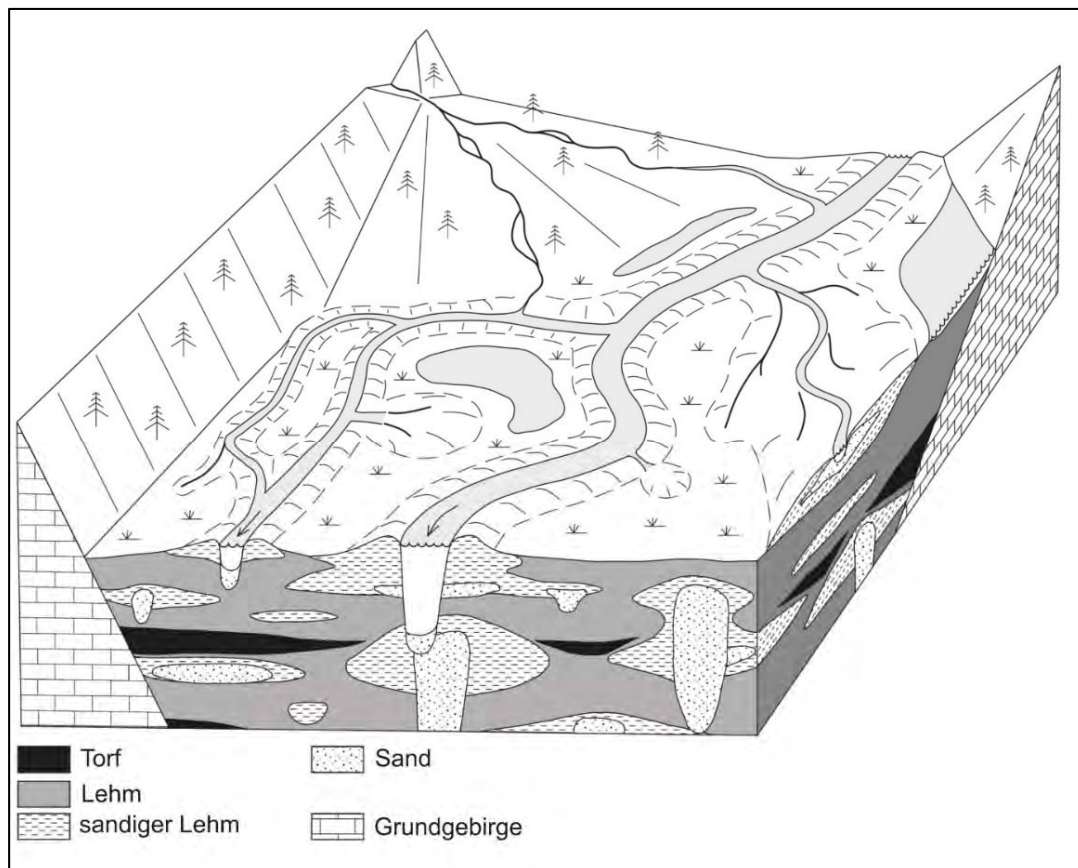
Während vor der Ausbreitung der Landwirtschaft viele Flüsse und wahrscheinlich auch größere Bäche in verflochtenem Lauf den gesamten Talboden genutzt und sich bei erhöhten Abflüssen ständig verlagert hatten, legte sich nun der Lehm in der ganzen Aue über Kies und Sand. Er bot schnell wachsenden Pionierpflanzen bessere Bedingungen als der blanke Kies, der in der Vegetationszeit durch Trockenheit und Hitze außer für wenige Spezialisten besiedlungsfeindlich ist. Auehm und Pflanzendecke bildeten bald eine stabilisierende Deckschicht, wie es unter kühlen Klimabedingungen offenbar häufig vorkommt (s. SMITH 1976). Viele Buchten, Tümpel und Sümpfe in der Aue verschwanden unter den Feinsedimenten. Der Fluss konnte nur wenige Hauptgerinne freihalten und strömte bei Hochwasser zwar durch die Aue, aber über dem Lehm – und damit ohne den Kies zu verlagern. Das Grundwasser blieb in der Kiesschicht.

Der ursprünglich hochdynamische verflochtene Fluss (braided river) änderte seinen Typ, wurde zumindest eine Zeitlang ein verzweigender oder verzweigter Fluss (anabranching river). Der deutsche Name für diesen Flusstyp ist nicht eindeutig, denn Verzweigungen hat der verflochtene oder Wildfluss auch, allerdings sind diese nicht stabil. Die Arme eines „stabilen verzweigten Flusses“ dagegen verlagern sich mittelfristig nur wenig. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Morphologietypen ist, dass von Flussarmen umschlossene Inseln oder Auentile im verflochtenen Fluss niedrig sind, im verzweigten Fluss aber so hoch wie der bordvolle Abfluss bzw. so hoch wie die Auen-Oberfläche (NANSON & KNIGHTON 1996, KNIGHTON 1998), so dass sie –

im Gegensatz zu den Sedimentbänken (bars) des Wildflusses – bei Mittelwasser und kleinen Hochwassern nicht überflutet werden. Überwiegend sind die „Inseln“ oder Auteile in verzweigten Flüssen vegetationsbedeckt (z.B. ROSGEN 1996), außerdem deutlich größer als die unbewachsenen Sand- und Kiesbänke (sand bars, gravel bars) der verwilderten Flüsse. Verzweigte Flüsse sind insgesamt gesehen relativ selten (WOHL 2014).

Eine Unterkategorie des verzweigten Flusses ist der anastomosierende Fluss (anastomosing river) im Sinne von MAKASKE (2001): ein Fluss mit zwei oder mehr miteinander verbundenen Armen, die schüsselförmige „Auenbecken“ (flood basins) umschließen.

Die relativ ortsfeste Lage der Gewässerarme führt bei geringem Talgefälle und hoher suspendierter Sedimentfracht des Gewässers (suspended load) zur Ausbildung von Uferreihen (natural levees), das sind niedrige, parallel zum Gewässer verlaufende Uferwälle. Sie entstehen, wenn bei Hochwasser Sediment-beladenes Wasser in die Aue übertritt. Sobald es aus der starken Strömung des Flusses heraus ist, zusätzlich von der Ufervegetation gebremst wird (BRANß & DITTRICH 2016, BRANß et al. 2016) und plötzlich langsam fließt, verliert es Transportkraft und damit auch die mitgeführten Partikel. Die schwersten – also etwa Sandkörner – fallen zuerst aus der Suspension und bleiben dicht am Ufer liegen, so dass sich parallel zum Fluss Material ansammelt. Diese „Uferreihen“ werden allmählich zu den höchsten Erhebungen in der Aue. In Außenkurven sind sie besonders breit, an geraden Flussabschnitten schmal. Ein „Auenbecken“ – das auch als Insel betrachtet werden kann - ist daher nicht nur von Flussarmen umgeben, sondern auch von deren Uferreihen, wodurch sich die typische Schüsselform des Beckens ergibt (MAKASKE 2001).



**Abb. 10:** Schematisches Blockbild eines anastomosierenden Flusses (verändert nach MAKASKE et al. (2017))

Die Rehren verhindern eine schnelle Entwässerung von Auenbecken ohne seitliche Zuflüsse, so dass Stillgewässer, Sümpfe und Moore entstehen können. Wasserführende Auenbecken bzw. Wasserflächen in Auenbecken werden in Nordamerika als „backswamps“ bezeichnet, wofür es keinen deutschen Namen gibt.

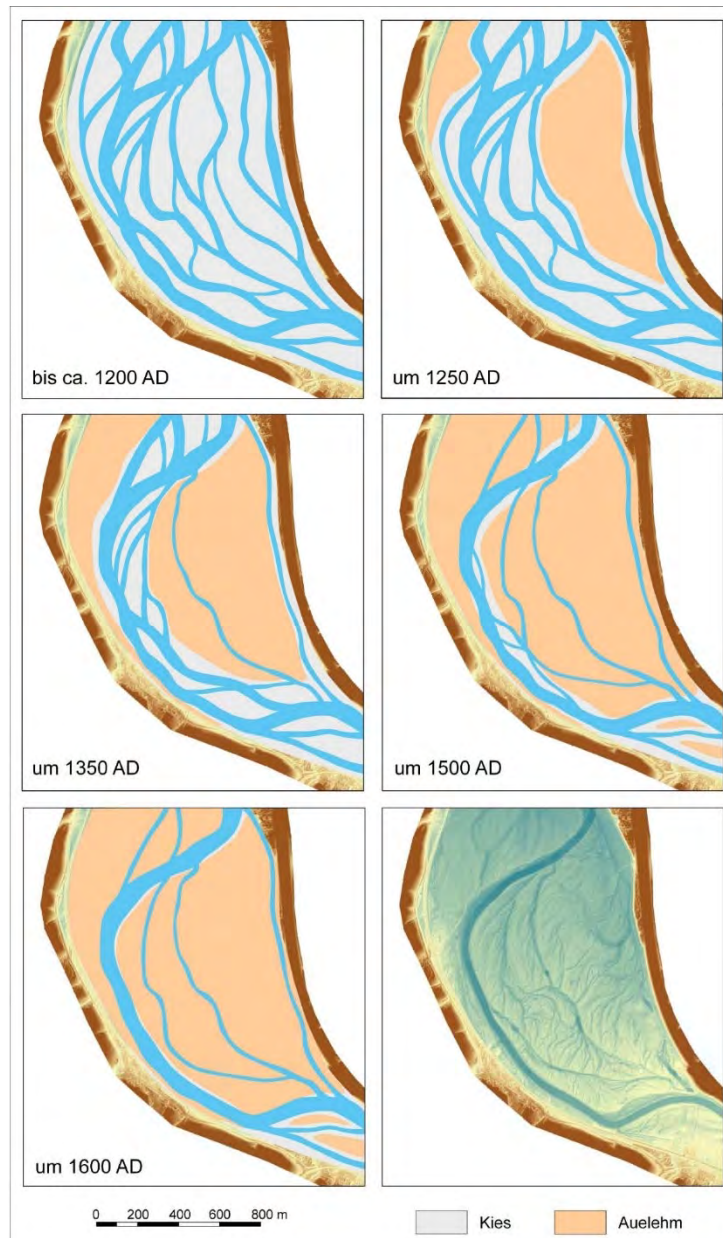
Anastomose tritt in gering geneigten Tälern auf. Typischerweise findet in der Aue starke Sedimentation statt (z.B. MAKASKE et al. 2017), wie im hier betrachteten Fall durch Auelehm. Anastomose kann ein Ungleichgewichts- oder Übergangszustand sein, der durch „Störungen“ des Flusses bzw. Veränderungen von Parametern wie Zunahme des Sediment-Transports ausgelöst werden könnte (MAKASKE et al. 2017).

Es wird angenommen, dass verzweigte Flüsse aller Typen (anabranching rivers) - also mit und ohne Uferrehnen - sowohl in einem dynamischen Gleichgewicht mittelfristig stabil sein als auch nur übergangsweise auftreten können, wenn plötzlich große Sedimentmengen auf dem Talboden verteilt und abgelagert werden müssen (JANSEN & NANSON 2004). Bei der einfachen Betrachtung eines verzweigten Flusses lässt sich nicht entscheiden, ob er ein Übergangsstadium darstellt oder sich im Gleichgewicht befindet. Die Ruhr flussabwärts der Möhнемündung brauchte für den Übergang vom verwilderten Fluss zum Einbettgerinne offenbar rund 400 Jahre (KASIELKE 2017), also noch recht kurz im Vergleich zum Niederrhein, wo der entsprechende Vorgang etwa 2500 Jahre dauerte (ERKENS 2009).

Während bei der Ruhr die geschilderte Metamorphose vom Wildfluss über den verzweigten Fluss bis zum Einbettgerinne nachgewiesen ist, siehe Abb. 11, (KASIELKE 2017) und auch die Weser am Ende des Weichsel-Glazials eine ähnliche Entwicklung durchlief (CASPER 1993), wird eine solche Metamorphose bei der Lippe nur vermutet, ist aber noch nicht nachgewiesen. So fand HERGET (1997) im Lippetal zwischen Datteln und Haltern-Flaesheim fossile Auengerinne, die zu klein dimensioniert waren, um den gesamten Fluss aufnehmen zu können, weshalb er die Lippe in den ersten nachchristlichen Jahrhunderten als wahrscheinlich anastomosierend einordnet.

Die Ruhr wies in ihrer verzweigten Phase allenfalls niedrige Uferrehnen auf (KASIELKE 2017); die mittlere Lippe hatte einst ausgeprägte Uferwälle (SKUPIN 1995, 2004), die sie noch heute besitzt. Sie war damit in der Übergangszeit vom Wildfluss zum Mäanderfluss ein typischer anastomosierender Fluss, was ihrem gefällearmen Tal (0,4 ‰, s. KOENZEN 2005) entspricht. Dagegen gehört die Ruhr zu den gefällereichen Flussaue (0,8 / 1,5 ‰) des Grundgebirges (KOENZEN 2005), wo die Rehrenbildung nicht ausgeprägt ist. Gleiches trifft für die Möhne zu.





**Abb. 11:** Modell zur Flussentwicklung der Ruhr im Fuchter Bogen seit Beginn der Auelehmbildung (aus KASIELKE 2017): vom verflochtenen oder Wildfluss zum Einbettgerinne

## 2.7 Einbett-Flüsse

Die Entwicklung vom verzweigten Fluss zum Einbettgerinne verläuft offenbar sehr langsam.

Wahrscheinlich wurde der nächste Schritt der Entwicklung dadurch eingeleitet, dass sich die parallel verlaufenden Flussarme allmählich durch Sedimente auffüllten, bis nur noch ein Gerinne übrig war, ähnlich wie bei der ohne menschlichen Einfluss erfolgten Verwandlung des Niederrheins vom Wildfluss zum Einbettgerinne (ERKENS 2009, s.o.). Das Breiten-Tiefen-Verhältnis des Einbettgerinnes war nun viel geringer als das der Arme des ursprünglichen verzweigten Flusses. Es entstand ein schmales gewundenes oder mäandrierendes Gewässer, das sein Bett wegen der Ufer aus kohäsivem Auelehm nur noch sehr langsam lateral verschob. Das hatte weitere Folgen für die Morphologie von Fluss und Aue. Im Sommer trockenfallende Sedimentbänke traten nicht mehr als Inseln auf wie im verzweigten Fluss, sondern lagen nur noch an den Innenkurven der Mäander.

Wie anastomosierende Flüsse besitzen auch mäandrierende Flüsse mit geringem Talgefälle ausgeprägte Uferrehnen und damit Auenbecken bzw. „backswamps“. An Flüssen und Bächen mit größerem Gefälle, wie es die meisten Fließgewässer des Rheinischen Schiefergebirges aufweisen, entstehen keine Uferrehnen, weil bei Hochwasser die gesamte Aue durchflossen wird.

Als Sonderform von Auengewässern lassen sich Randsümpfe betrachten. Sie werden von Grundwasser gespeist, das am Fuß der Flussterrasse austritt und verschiedenartige Gewässer ausbilden kann. Sie kommen sowohl an Fließgewässern mit und ohne Rehnenbildung vor.

Uferrehnen verhindern, dass seitliche Zuflüsse den Fluss auf dem kürzesten Weg erreichen. Nebenbäche fließen oft längere Strecken parallel zum Fluss durch die Aue, bis sie auf eine Lücke in den Rehnen treffen. Dieser Vorgang heißt „Mündungsverschleppung“ (belated confluence); die „verschleppten“ Gewässer werden in Amerika „yazoo tributaries“ genannt (nach einem „verschleppten“ Nebenfluss des Mississippi).

Bei Hochwasser durchbricht der Fluss manchmal eine Uferrehne – meist auf einer geraden Strecke mit schmaler Verwallung, ein Vorgang, der als Avulsion bezeichnet wird. MAKASKE (2001) definiert Avulsion als die Ableitung von Abfluss aus einem Flussbett in die Aue, woraus schließlich ein neuer Flussarm entstehen kann. Am Ort des Durchbruchs durch die Uferrehne entsteht mitunter eine tiefe Ausspülung, die auch bei Deichbrüchen bekannt ist und in diesem Zusammenhang in Norddeutschland als „Brack“, „Brake“ (z.B. HELM 2003) oder „Wehle“ (STORM 1888) bezeichnet wird.

Hinter einem Rehnen-Durchbruch lagert sich typischerweise ein Durchbruchs-Schwemmfächer (crevasse splay) ab, da das hinter der Lücke in der Rehne langsamer strömende Wasser mitgeführte Sedimente verliert.

Das Ergebnis eines Durchbruches, einer Avulsion, kann eine Flutrinne sein, ein relativ gestreckt in die Aue führendes Gewässer, das bei erhöhten Abflüssen anspringt, bei Niedrigwasser aber bis auf Kolke und andere Vertiefungen austrocknet. Auch Flutrinnen bilden mit der Zeit Uferrehnen aus. Führt eine solche Rinne nicht nur in ein Auenbecken hinein, sondern spült ein komplettes Bett aus und wird irgendwann ständig durchflossen, ist der Zustand der Anastomose erfüllt (s.o.).

Rinnen, in denen abschnittsweise auch in Trockenzeiten fließendes Grundwasser freiliegt, heißen am Rhein „Gießen“.

Flutrinnen, mündungsverschleppte Zuflüsse und „backswamps“ können in der Aue ein komplexes Gewässersystem formen, in dem Biberstau für weitere Variationen sorgen.

Die Verbindung eines von einem Nebengewässer durchflossenen Auenabschnitts mit dem Fluss tritt spätestens an der Stelle auf, an der der Fluss den Terrassenrand erreicht. Hier entleert sich bei Hochwasser das gesamte Gewässersystem des Auenabschnitts, was oft einen „Mündungstrichters“ ausspült.

Vereinzelt und nur in großen zeitlichen Abständen entstehen in der Aue mäandrierender Flüsse mit und ohne Uferrehnen noch weitere und größere Stillgewässer. Durch Mäandermigration abgeschnittene Schlingen können zu angebundenen Altarmen und schließlich zu abgeschnittenen Altwässern werden. Durch die Kies- oder Sandschichten unter dem Auelehm kommunizieren sie mit dem Grundwasser. Solche großen, langfristig - z.T. über Jahrhunderte - existierenden Auengewässer fehlen in verflochtenen Flüssen und sind in anastomosierenden Gewässern selten.

Kleine, im Auelehm liegende Stillgewässer ohne Grundwasserkontakt sind z.B. Ausspülungen, die bei Hochwasser hinter Hindernissen entstehen oder Löcher, die Wurzelteller umstürzender

Bäume reißen. Wird bei solchen Gewässern die Lehmschicht durchstoßen, können sie im Sommer bei niedrigem Grundwasserstand nach unten „auslaufen“, während bei hohem Grundwasserstand u.U. artesische Quellen auftreten können.

Sehr viele Bach- und Flusssauen Mittelwestfalens sind heute von einer Auelehmschicht bedeckt, die wenige Dezimeter bis mehrere Meter umfasst. Dennoch kann Kies aus dem Gewässerbett bei größeren Hochwassern auch auf die Oberfläche des Auelehms gespült werden, wie es z.B. bei dem Jahrhunderthochwasser im Arnsberger Wald im August 2007 in einigem Umfang geschah. Außerdem sind im Sauerland an einigen Stellen Schwemmkegel aus Kies auf der Auelehmdecke entstanden, wo Bäche der Seitentäler mit steilerem Gefälle in große ebene Talauen münden (z.B. CLAUSEN 1984, CLAUSEN & LEUTERITZ 1984).

Für Fische dürfte die Umwandlung von Wildflüssen mit vielen, aber überwiegend nicht dauerhaften Auengewässern hin zu gewundenen oder mäandrierenden Flüssen mit langlebigeren Stillgewässern einen Vorteil für euryöke und limnophile Arten bedeuten und damit eine Verlagerung der Fischregion nach unten. Der Typ des mäandrierenden Flusses ist heute mit Abstand der am weitesten verbreitete Morphologietyp (Leopold).

## 2.8 Einfluss des Bibers auf die Morphologie von Bächen

Während zur Geschichte der Flüsse und ihrer Auen seit der letzten Eiszeit mittlerweile zahlreiche Untersuchungen vorliegen, ist das Aussehen der Bäche schlechter erforscht. Für größere Bäche oder kleine Flüsse (in Mittelwestfalen z.B. Möhne, Oberlauf der Ruhr, Alme, Ahse) lässt sich ein ähnlicher Ablauf wie der für Flüsse geschilderte annehmen.

An kleineren Bächen ist dagegen spätestens nach dem Einsetzen der Wiederbewaldung zu Beginn des Holozäns mit einem erheblichen Einfluss des Bibers zu rechnen. Noch im Mittelalter war die Art auch in Mittelwestfalen weit verbreitet (FELDMANN 1984), aber die Angaben in Conrad GESNERS „Thierbuch“ (1581) weisen darauf hin, dass die Art im 16. Jahrhundert in Mitteleuropa nur noch an wenigen Stellen vorkam.

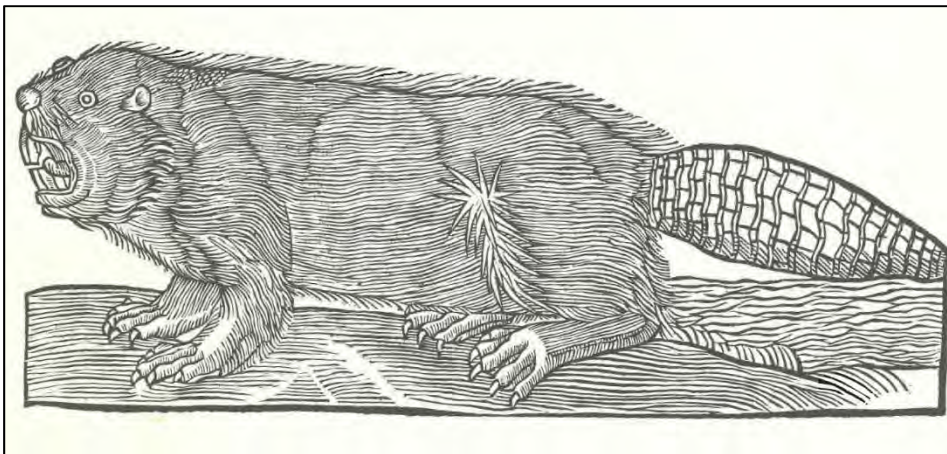


Abb. 12: Biber (aus GESNER 1581)

### 2.8.1 Ort des Bibereinflusses

Biber können von Bächen und Flüssen bis zu Mooren und Seen viele verschiedenartige Gewässertypen besiedeln. Gemieden werden nur wenige Typen, z.B. Fließgewässer im Gebirge, län-

gere Abschnitte mit freiliegendem Felsgrund und verflochtene „Wildflüsse“ mit ihren Kiesebenen (z.B. GURNELL 1998). Aber nicht überall, wo Biber vorkommen, verändern sie die Landschaft spürbar, denn der Dammbau mit seinen erheblichen Einflüssen auf das Ökosystem erfolgt nur in ganz bestimmten Lebensräumen.

Biber errichten Dämme nur dort, wo die Wassertiefen oder die Ausdehnung von Wasserflächen für ihre Habitatansprüche zu gering sind. An allen anderen Stellen beschränken sich die landschaftsprägenden Tätigkeiten der Nager auf das Fällen von Gehölzen, die Anlage von Erdbauen im Ufer oder Biberburgen (lodges) in Wasserflächen sowie den Bau von „Kanälen“ (canals), die z.B. vom Bibersteich zu bevorzugten Fressplätzen führen.

Die folgenden Absätze über die Lebensraumgestaltung des Bibers beziehen sich sowohl auf den Europäischen Biber *Castor fiber* wie auf die nordamerikanische Art *Castor canadensis*, über die mehr Literatur vorliegt. Frühere Vermutungen, dass sich das Verhalten der beiden Arten unterscheidet, z.B. dass der amerikanische Biber eine höhere Dammbau-Aktivität zeigt, sind durch Studien in Karelien widerlegt, wo beide Arten nebeneinander vorkommen (DANILOV et al. 2011).

Wo bauen Biber Dämme?

HEIDECKE & KLENNER-FRINGES (1992) stellten an der Elbe fest, dass an Bächen und Gräben 66 % der dort gelegenen Biberreviere (n = 104) mindestens einen Damm aufwiesen, an der Elbe und größeren Zuflüssen (n = 75) dagegen nur 13 %. Meist wurden Dämme bei der Unterschreitung eines Mindestwasserstands von ca. 30 cm angelegt. Die durchschnittliche Stauhöhe betrug 30 – 70 cm, die maximale 140 cm.

Nach NAIMAN et al. (1986, 1988) finden sich in Nordamerika die meisten Dämme in kleinen und mittelgroßen Fließgewässern mit Ordnungszahlen (stream order) von 1 bis 5.

Das Ordnungszahlensystem (hier gemeint nach STRAHLER 1957) ist eine Methode, um u.a. die Größe eines Baches oder Flusses zu beschreiben. Da sie jedoch skalenabhängig ist und je nach Kartenmaßstab andere Ordnungszahlen ergibt, eignet sie sich nicht für eine Habitatanalyse des Bibers.

Als obere Grenze für Bibergewässer nennt DALBECK (2011) „bewaldete, schmale Kerbtäler mit < 3 l/s Minimalabfluss im Mittelgebirge (z.B. im Hürtgenwald, Kreis Düren)“; nach POLLOCK et al. (2003, 2015) werden Täler mit Sohlbreiten von weniger als 46 m und Bäche mit einem Gefälle von mehr als 6 % gemieden. BASKIN et al. (2011) geben als minimale Wassertiefe 40 cm an und DALBECK (2011) minimale Bachbreiten von weniger als 1,50 m. Damit besiedeln Biber auch die obere Forellenregion und sparen nur die Quellregion kleiner Bäche aus.

Die untere Grenze für den Bau permanenter Dämme ist in der Literatur schlecht dokumentiert und dürfte von Region zu Region variieren (POLLOCK et al. 2003).

Nach HARTMAN (1994, zitiert in GURNELL 1998) bauen Biber in Schweden Dämme normalerweise nur in flachen Gewässern mit Breiten unter 10 m. Diesen Wert nennen auch HEIDECKE & KLENNER-FRINGES (1992) für ihr Untersuchungsgebiet an der Elbe. JOHN & KLEIN (2014) schildern Ergebnisse von der 4 – 8 m breiten und 1 – 1,5 m tiefen Jossa im Spessart, wo Biberdämme jedes Jahr von Hochwasser zerstört wurden, weil das Gewässerbett offenbar zu breit bzw. der Abfluss zu stark war. Gewässerbreite gibt also einen Anhaltspunkt, ist aber kein verlässliches Maß zur Beschreibung von Biber-Habitaten.

Ein für den Vergleich verschiedener Gewässer gut geeignetes Maß wäre der Abfluss; leider liegen dazu aber in der Biber-Literatur so gut wie keine Daten vor. Die Größe des Einzugsgebietes (catchment area, drainage basin, watershed) ist weniger aussagekräftig, weil sie - neben z.B.

der Niederschlagsmenge - nur **ein** Faktor ist, der den Abfluss bestimmt; aber zu diesem Parameter existieren einige Zahlen:

- Ein subfossiler Biberdamm am Bieberbach an der Oelinghauser Mühle in Nordrhein-Westfalen (SCHNETTLER 1895) hatte ein oberhalb liegendes Einzugsgebiet von 10 km<sup>2</sup> bei einem aktuellen jährlichen Niederschlag von etwa 1000 mm.
- POLLOCK & PESS (1998) fanden im Stillaguamish-Flussgebiet (Washington) nahezu alle der 341 entdeckten Biberdämme in Gewässern mit Einzugsgebieten von weniger als 15 km<sup>2</sup>. Der Jahresdurchschnitt des Niederschlags ist hier allerdings recht hoch, nämlich zwischen 800 und 3800 mm.
- Am Savannah River in South Carolina (jährlicher Niederschlag ca. 1200 mm) bauten Biber Dämme mit der größten Wahrscheinlichkeit in Gewässerabschnitten mit Einzugsgebietsgrößen um ca. 25 km<sup>2</sup>; an Abschnitten mit Einzugsgebietsgrößen < 5 km<sup>2</sup> und > 50 km<sup>2</sup> befanden sich fast keine Dämme (JAKES et al. 2007).
- Am Oberlauf der Alme zwischen Brilon-Alme und der Mündung der Nette in Nordrhein-Westfalen (oberirdisches Einzugsgebiet 40 km<sup>2</sup>, unterirdisches durch Verkarsung etwas größer, jährlicher Niederschlag ca. 1000 mm) befand sich in einer über 200 cm mächtigen Torfschicht das unvollständige Skelett eines nicht ausgewachsenen Bibers mit einem kalibrierten Alter von rund 6000 Jahren BC (eigene Beobachtung, Abb. 13). Die Torfablagerungen könnten durch einen Biberteich entstanden sein.
- Ein Biberdamm aus dem Jahr 400 v.Chr. an der Wäster (Möhne-Einzugsgebiet) in Nordrhein-Westfalen umfasste ein Einzugsgebiet von 49 km<sup>2</sup> mit einem aktuellen jährlichen Niederschlag von 1000 – 1100 mm (BUNZEL-DRÜKE & ZIMBALL 2004).
- Aus dem Staat Washington liegt der historische Nachweis eines Biberdamms an einem Gewässer mit einem Einzugsgebiet von 107 km<sup>2</sup> vor (POLLOCK et al. 2003).
- An der Nordseite des Möhnetals an der Mündung der Küttelbecke bei Rütten (Einzugsgebietsgröße der Möhne 97 km<sup>2</sup>, Küttelbecke 9 km<sup>2</sup>, jährlicher Niederschlag um 1000 mm) wurde unter dem Auelehm eine 100 cm mächtige Torfschicht gefunden (CLAUSEN & LEUTERITZ 1984); es könnte sich dabei um Reste eines Biberteiches an Möhne oder Küttelbecke handeln, allerdings auch um einen Randsumpf. Weniger als 1 km bachabwärts von dieser Stelle erfolgte 2016 der Fund eines vom Biber benagten Holzes unter dem Auelehm der Möhne (eigene Beobachtung).
- Das Einzugsgebiet der Jossa im Spessart, wo den Bibern nicht weit oberhalb der Mündung des Gewässers nur saisonale Dammbauten gelangen (JOHN & KLEIN 2014, s.o.) ist an der Mündung 147 km<sup>2</sup> groß bei einem durchschnittlichen Jahresniederschlag um 1000 mm. Biberdämme in demselben Raum im System von Westernbach/Gronaubach mit einem maximalen Einzugsgebiet von 26 km<sup>2</sup> waren permanent (HARTHUN 1998).
- NAIMAN et al. (1984, in POLLOCK et al. 2003) berichten von saisonalen Dämmen, die am Unterlauf des Muskrat River (Quebec) mit einem Einzugsgebiet von 207 km<sup>2</sup> angelegt wurden.
- 1998 wurde ein stabiler Biberdamm am Little Colorado River (Arizona) mit einem flussaufwärts gelegenen Einzugsgebiet in der Größe von 280 km<sup>2</sup> entdeckt (POLLOCK et al. 2003); die jährliche Niederschlagsmenge beträgt allerdings weniger als 600 mm.
- An der Möhne bei Himmelpforten mit einem 444 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet nennt ein Bericht aus dem Jahr 1805 als unerwünschte Aktivitäten des Bibers die Vernichtung von Weiden-Anpflanzungen und das Untergraben von Ufern, nicht aber den Dammbau (PIELER 1875).



**Abb. 13:** links: Torfschichten in einem Steilufer der Alme nördlich Brilon-Alme.

rechts: Knochen eines vor ca. 8000 Jahren gestorbenen, nicht ausgewachsenen Bibers in der Torfschicht

Die Daten sind sehr lückig, aber sie legen nahe, dass die Einzugsgebiets-Obergrenze für ganzjährig stabile Biberdämme in Nordrhein-Westfalen um 50 bis 100 km<sup>2</sup> liegt.

Dammbauten in größeren Einzugsgebieten beschränken sich auf Gewässer abseits des Hauptflusses wie Gießen (groundwater channel) oder kleinere Zuflüsse. Manchmal werden in Niedrigwasserzeiten auch saisonale Dämme gebaut (POLLOCK et al. 2015).

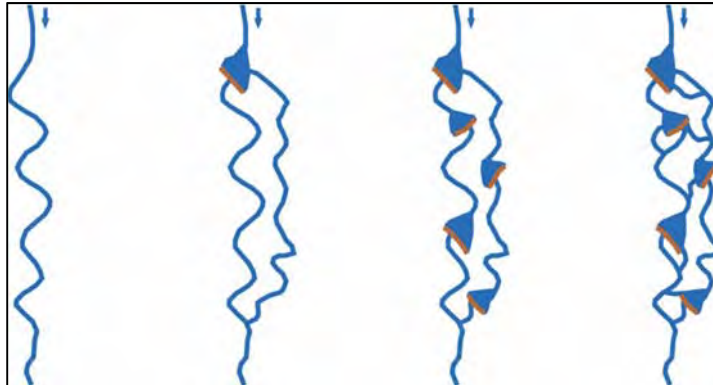
Im Möhne-Einzugsgebiet wird der Übergang von der unteren Forellen- zur Äschenregion am Zusammenfluss von Möhne und Wäster verortet (NZO & IfÖ 2007). Hier beträgt die Größe des Gesamt-Einzugsgebiets 259 km<sup>2</sup>. Die anderen Gewässerabschnitte des Äschentyps im Ruhr-Einzugsgebiet beginnen mit Einzugsgebietsgrößen zwischen 97 (Hönne) und 287 (Bigge) mit einem Schwerpunkt um 150 km<sup>2</sup>. Wenn diese Abgrenzungen im Naturzustand ähnlich lagen, wären Biberdämme in der Forellenregion sehr verbreitet, in der Äschenregion aber selten und z.T. nur saisonal gewesen.

Viele größere Bäche wie die mittlere und untere Möhne dürften vor dem Mittelalter in verflochtenem Lauf die gesamte Talsohle genutzt haben. Die flachen, kiesigen Gewässerarme und die ständigen Umlagerungen der Sohle machten diesen Lebensraum wahrscheinlich insgesamt für Biber wenig geeignet, d.h. die Biber bauten nicht nur keine Dämme, sondern auch keine Erdbaue oder Burgen, da es an Gehölzen und anderer terrestrischer Vegetation in der Aue mangelte. Wahrscheinlich kam es erst mit der Auelehmbildung zur dauerhaften Ansiedlung von Bibern in der Äschen- und Barbenregion des Sauerlandes, dann jedoch überwiegend ohne Dammbau.

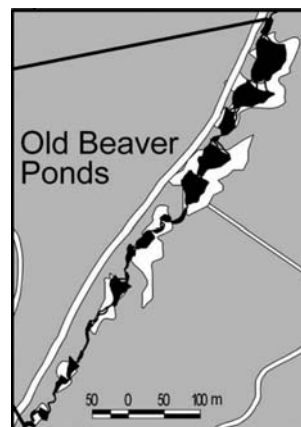
### 2.8.2 Morphologie von Bächen der Forellenregion unter dem Einfluss des Bibers

Wie sahen Mittelgebirgsbäche der Forellenregion unter dem Einfluss des Bibers einst aus?

Untersuchungen in Nordamerika stellten 7,5 bis 74 Dämme pro Kilometer Gewässer fest; bei geringem Gefälle (< 1 %) waren etwa 10 Dämme pro Kilometer typisch (POLLOCK et al. 2003, 2015). Dabei sind die Dämme meist nicht gleichmäßig verteilt, sondern in einem begrenzten Gewässerabschnitt liegen mehrere Dämme dicht hinter- oder nebeneinander (POLLOCK et al. 2015), während andere Bachstrecken ohne Stau frei fließen. In naturnahen Landschaftsteilen von Quebec sind bis zu 30 – 50 % der Gesamtlänge kleiner Bäche vom Biber beeinflusst.



**Abb. 14:** Entstehung eines „Biberwiesenkomplexes“ (beaver-meadow complex) durch Anwachsen der Biberpopulation (verändert nach POLVI & WOHL 2012): Überlaufende Biberteiche verursachen eine Zunahme von Avulsionen, dadurch entstehen Verzweigungen des Gewässers. Die Speicherung von Feinsedimenten führt zur Ausbildung von relativ flachen, breiten Tälern in der Forellenregion.



**Abb. 15:** Abschnitt eines Baches der Forellenregion mit Biberteichen im Hürtgenwald in der Eifel (aus DALBECK et al. 2007)

Biberstau verändern Forellenbäche und ihre Umgebung auf verschiedene Weise (z.B. POLLOCK et al. 2003, DALBECK et al. 2007, POLVI & WOHL 2012, SCHLOEMER et al. 2012, POLLOCK et al. 2015, WEBER et al. 2017, SOMMER et al. 2019):

- Biber schaffen Stillgewässer und verringern die Länge frei fließender Bachabschnitte
- Der Grundwasserspiegel steigt, Wasser wird gespeichert, der Abfluss gleichmäßiger.
- Obwohl die Wassertemperatur eines Baches im Sommer durch die Passage durch einen Biberteich ansteigen kann, senken Komplexe von Biberteichen insgesamt gesehen

die Wassertemperatur eines Baches im Vergleich zu einem Gewässer ohne Biberdämme, weil solche Komplexe von Biberdämmen größere, kühle Grundwasservolumina bewirken.

- Biberteiche und „Biberwiesen“, die in ihrer Umgebung durch Herbivorie von Bibern und Huftieren entstehen, bieten in geschlossenen Wäldern offene Habitate.
- Viele Arten profitieren von Bibertätigkeiten, u.a. Fledermäuse, Wasservögel, Amphibien, Fische und Libellen.
- Feinsedimente, aber auch Kies wird in Biberteichen mittel- bis langfristig zurückgehalten. Die Gefahr einer Kolmation von bachabwärts gelegenen Kiesbänken sinkt.
- Langjährige Biberaktivitäten können Kerbtäler in Sohlentäler verwandeln und damit auch anthropogen verursachtes Einschneiden von Bächen in den Untergrund rückgängig machen.
- Biberteiche können Initiale für Torfbildung liefern und die Entstehung von Mooren auslösen.
- Biberdämme können über Jahrzehnte bestehen, aber auch durch Hochwasser oder fehlende Unterhaltung nach einem Abwandern der Biber brechen. Die gespeicherten Sedimente können dann trotzdem langfristig am Ort verbleiben oder auch plötzlich ausgespült werden und bachabwärts gelegene Habitate beeinträchtigen.

Die Vorstellung von Forellenbächen des Mittelgebirges als im „natürlichen Zustand“ gestreckte, gleichmäßig fließende Gerinne, die überall nur Lebensgemeinschaften des Rhithrals enthalten, entspricht also überwiegend nicht dem natürlichen Zustand (s. DALBECK 2011).

Für die obere Forellenregion wäre eine Wiederansiedlung bzw. Ausbreitung des Bibers besonders wichtig; seine Dämme würden eine Wasserspeicherung auch in Trockenzeiten bewirken und zusätzlich einen Teil der Feinsedimente zurückhalten, was u.a. der Kolmation von bachabwärts gelegenen Kiesbänken entgegen wirkt. Im naturnahen Zustand würden sich mäandrierende bis gestreckte Bachverläufe mit Biberteichen abwechseln.

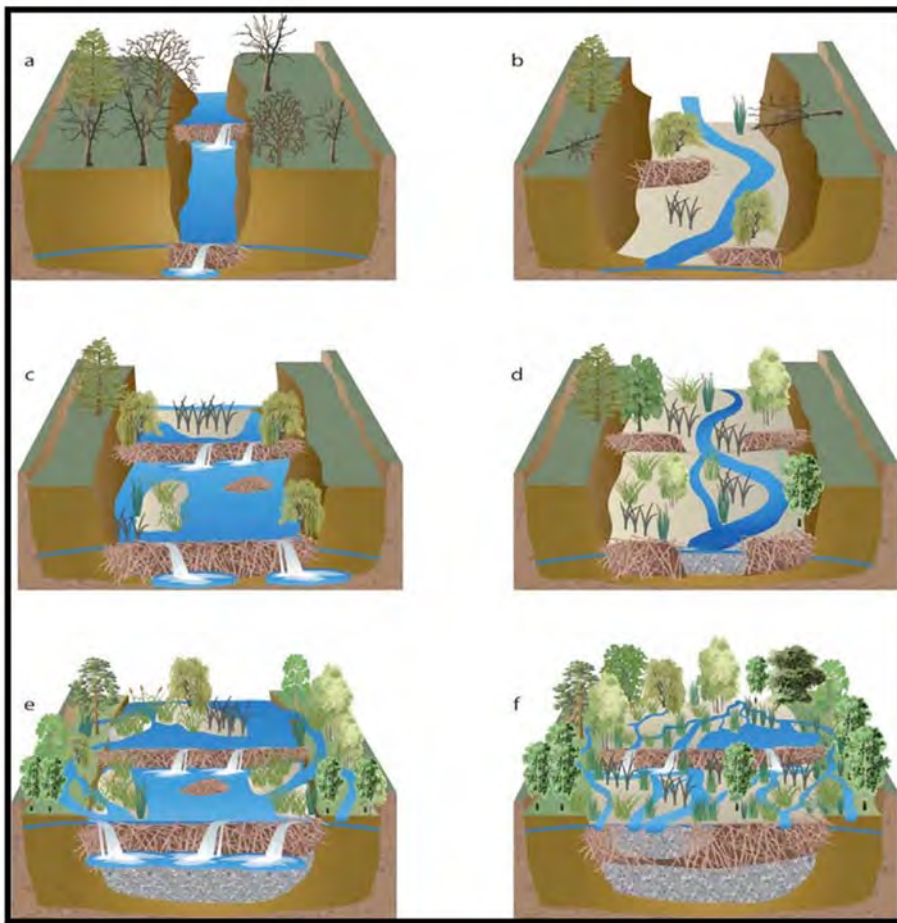


**Abb. 16:** Biberteich in der Eifel



Zur Sedimentdeposition auch subfossiler Biberteiche fehlen in Deutschland Publikationen. Lehm, der in Biberteichen gespeichert wird, entspricht in seiner Zusammensetzung im Wesentlichen dem Hanglehm (hill loam, slope loam) der benachbarten Talflanken und würde „Auelehm“ (highflood loam, alluvial loam) genannt, wenn er vom Hochwasser in Auen deponiert würde. Die Genese von Lehmaglagerungen über Kies in Bachauen der Forellenregion lässt sich also nicht ohne weitere Untersuchungen erkennen. Die Ablagerungen können durch Hangrutschungen, Deposition durch Hochwasser oder Sedimentansammlungen in ehemals vorhandenen Biberteichen entstanden sein.

In Nordamerika wird der Dammbau von Bibern als Renaturierung von unnatürlich eingeschnittener Bächen verstanden (z.B. POLLOCK et al. 2015) (Abb. 17). Der in Abbildung 15 gezeigte Ablauf findet jedoch nur bei hoher Sedimentfracht des Baches in überschaubaren Zeiträumen statt!



**Abb. 17:** Schematische Darstellung, wie Biberdämme eingeschnittene Bäche verändern (aus Pollock et al. 2015): (a) Biberdämme in schmalen, unnatürlich eingetieften Bächen können bei hoher Flussleistung (stream power  $\Omega$ ) brechen oder werden seitlich umflossen, was den Bach-Einschnitt aufweitet, wodurch (b) eine Ersatzau (inset floodplain) entsteht. Die Flussleistung ist nun geringer, dadurch werden Biberdämme breiter und stabiler (c). Durch eine hohe Sedimentfracht verlanden Biberteiche schnell und werden zeitweise aufgegeben. Das abgelagerte Sediment erleichtert das Aufkommen von Ufervegetation (d). Der Gesamtprozess wiederholt sich, bis die Biberdämme den Wasserspiegel so weit anheben, dass der Bach wieder Kontakt zu seiner ursprünglichen Aue bekommt (e). Schließlich (f) entsteht wieder ein komplexes System aus Biberdämmen, lebender Vegetation und Totholz, das das Gefälle reduziert und den Grundwasserspiegel so weit hebt, dass durch Avulsionen Mehrbettgerinne entstehen, die oft mit weiteren Auengewässern verbunden sind. Der gesamte Talboden ist wassergesättigt.

### 2.8.3 Biber und Fische

Während heute kaum noch jemand glaubt, dass Biber Fische verzehren – was bereits im 16. Jahrhundert bezweifelt wurde (s. GESNER 1581) – bestehen vielfach noch Zweifel darüber, ob Biberdämme für Fische allgemein mehr Vor- oder mehr Nachteile bringen.

Eine Überblicksarbeit über die Wirkung von Biberdämmen auf Fische veröffentlichten KEMP et al. (2012). Danach profitieren verschiedene Arten wie junge Salmoniden, Elritzen und Quappen von den Bibertätigkeiten. Negative Auswirkungen auf Wanderungen von Forelle und Lachs treten meist nur kurzzeitig und lokal auf. Bibersteiche können für große Fische als Winterlager sowie Rückzugsräume in Trockenzeiten oder Kälteperioden fungieren.

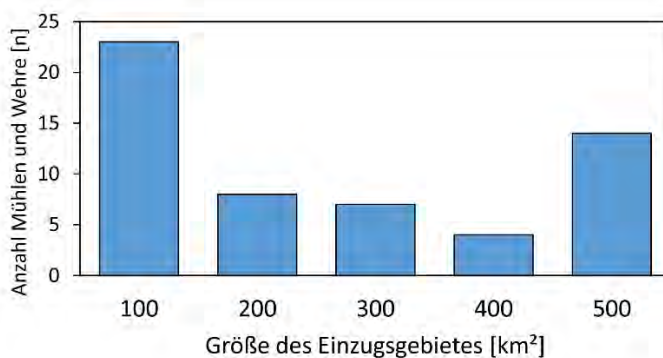
Bei Niedrigwasser können Biberdämme als Barrieren für Fische wirken, bei steigendem Abfluss finden Fische viele Wege über den Damm sowie durch oder unter dem Damm (POLLOCK et al. 2015). Ähnliche Ergebnisse publizierten LOKTEFF et al. (2013): Bachforellen überwinden die meisten Dämme, während in Jahren mit niedrigem Abfluss oberhalb von Dämmen weniger Laichgruben des Atlantischen Lachses zu finden sind als in abflussreichen.

## 2.9 Anthropogene Einflüsse auf den Kieshaushalt von Fließgewässern des Sauerlands ab dem Mittelalter

Die starke Ablagerung von Auelehm in den Talauen des Sauerlands seit dem frühen Mittelalter verwandelte die meisten Gewässer in mäandrierende Einbettgerinne (s.o.). Die Auen wuchsen durch die Lehmdeposition in die Höhe, während die Gewässersohle unten im Kies verblieb. Die Ausuferungshäufigkeit sank, Hochwasser hinterließen in den Auen Lehm und vergrößerten damit den Abstand zwischen Sohle und Aue immer weiter. Der kohäsive Lehm behinderte seitliche Verlagerungen der Gewässer, so dass die einmal ausgebildeten Mäander recht stabil waren.

Seit dem Mittelalter wurden zunehmend Wassermühlen betrieben. Im Möhne-Einzugsgebiet staute typischerweise ein Wehr das Gewässer auf und leitete einen Teil des Wassers in einem hoch gelegenen Mühlenarm zu dem Wasserrad oder mehreren hintereinanderliegenden Mühlen, während der Altlauf – die Ausleitungsstrecke - unterhalb der Stauanlage als Hochwasserentlastung erhalten blieb. Mühlen an den Oberläufen nutzen teilweise den Bach direkt ohne Mühlenarm.

Die Zahl der Wassermühlen im Möhne-Einzugsgebiet zur Zeit der Preußischen Uraufnahme um 1839 betrug mindestens 43 mit zusätzlich mindestens 13 Stauwehren abseits von Mühlen. Abbildung 16 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Einzugsgebietsgrößen an den Mühlen- und Wehrstandorten.



**Abb. 18:**

Häufigkeitsverteilung der Einzugsgebietsgrößen der Gewässer an den Wassermühlen und Wehrstandorten im Flusssystem der Möhne 1839

Damit wird deutlich, dass Mühlenstau nicht mit Biberteichen zu vergleichen sind: Während Biberdämme wahrscheinlich nur selten in Gewässern mit Einzugsgebieten größer als 50 bis 100 km<sup>2</sup> vorkamen, betraf rund 60 % der Wasserkraftnutzung im 19. Jahrhundert Gewässerabschnitte mit Einzugsgebieten über 100 km<sup>2</sup>. Diese Stauhaltungen haben in der Naturlandschaft keine Entsprechung.

Dazu kommt, dass Stauhaltungen über lange Zeit als Geschiebefallen wirken können, so dass unterhalb jedes Wehrs ein Kiesmangel auftritt.

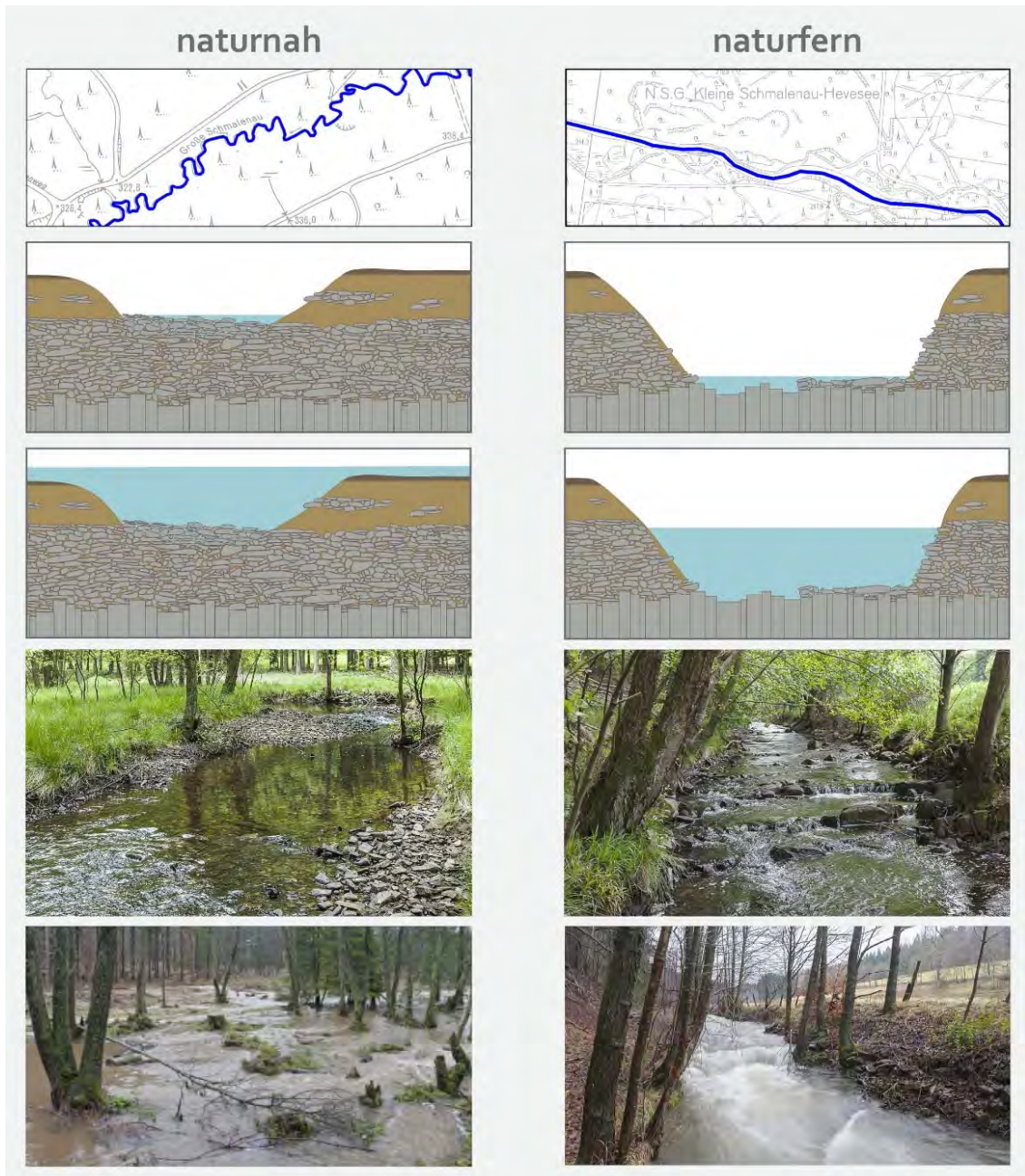
Zur Verbesserung bzw. Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung der Auen wurden auch im Sauerland viele Bäche und Flüsse umgebaut, oft an den Talrand verlegt. Begradigungen verkürzten den Lauf, erhöhten das Sohlgefälle und die Transportkapazität. Befestigte Gewässer, die keine Möglichkeit zur seitlichen Verlagerung mehr hatten, schnitten sich immer tiefer in den kiesigen Talboden ein und transportierten den Kies auf der Sohle ab, bis die ersten „Schwellen“ auftauchten, an denen das Grundgebirge freigelegt war. Zwar ist die allmähliche Ausräumung von Talsedimenten in einer Warmzeit natürlich, aber die Geschwindigkeit des Geschiebeverlustes ist durch menschliche Eingriffe heute um ein Vielfaches höher als im Naturzustand.



**Abb. 19:** „Felsrippen“ in der Möhne östlich Völlinghausen: Hier ist der Kieskörper so weit abgetragen, dass das Grundgebirge freiliegt.

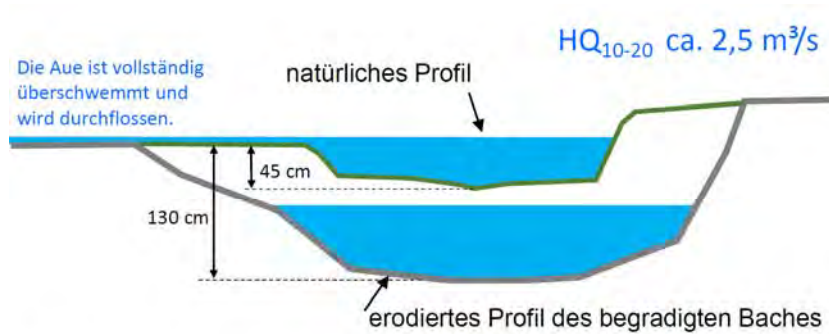
Das Einschneiden (incision) eines Fließgewässers in den Talboden vergrößert den Abstand zwischen Gewässersohle und Aue immer weiter und senkt außerdem den Grundwasserspiegel in der Aue. Während ursprünglich nahezu der gesamte Kieskörper in der Aue mit Wasser gefüllt war, bewirkt die Eintiefung des Gewässers ein Trockenfallen der oberen Kiesschichten, so dass der Wasservorrat in der Aue stark vermindert wird.

In Kombination mit der weiter andauernden Ablagerung von Auelehm nimmt die natürliche Vernetzung von Fluss und Aue immer mehr ab. Stillgewässer und Randsümpfe fallen (häufiger) trocken, Weichholzauwälder wandeln sich in Hartholzauwälder um. Immer seltener fließen Hochwasser auch in der Aue.



**Abb. 20:** Folgen des Ausräumens des Kieskörpers der Großen Schmalenau bei Möhnese-Neuhaus durch Begradigung und Eintiefen des Baches (aus ABU 2014): Der naturnahe Zustand (links) ist windungsreich, nur wenige Dezimeter in die Aue eingeschnitten. Bei Hochwasser tritt der Bach rasch über die Ufer und fließt durch die Aue. Im naturfernen Abschnitt (rechts) hat sich die Sohle bis zum Grundgebirge eingeschnitten. Hochwasser fließen mit großer Geschwindigkeit im begradigten, tiefen Bachbett.

Eine natürlicherweise oder durch menschliche Eingriffe gering mächtige Kiesschicht stellt ein Problem für anspruchsvolle Makrozoobenthos-Arten und kieslaichende Fische dar. Unter den Fischen sind v.a. die betroffen, die tiefe Laichgruben anlegen (Lachs, Forelle) oder deren Larven tief ins Interstitial vordringen (Elritze, s. BLESS 1992).



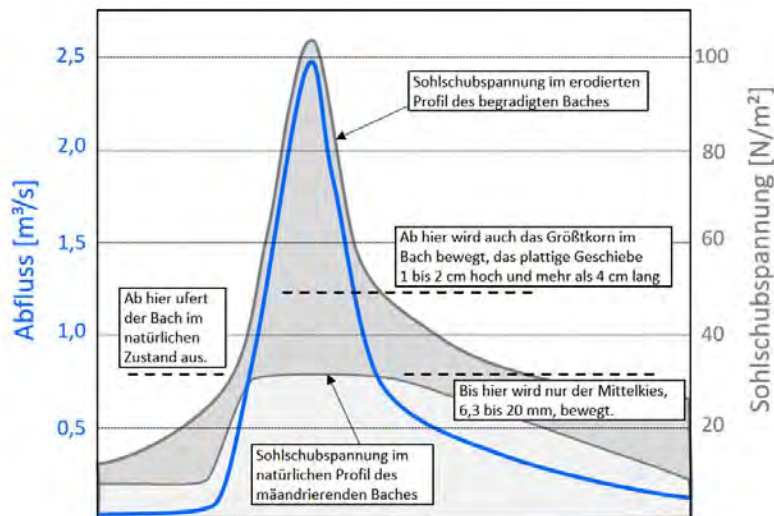
Kleine Schmalenau bei km 6,0 – EZG = 4,6 km<sup>2</sup>



Freilegung der Sohle eines Altlauf-  
rudiments der Kleinen Schmalenau  
bei km 6,0 am 31.10.2009 im  
Rahmen des LIFE-Projektes  
„Bachtäler Arnsberger Wald“



Vermessung des erodierten Verlaufs  
bei km 6.05 am 31.10.2009



Welle eines HQ<sub>10-20</sub> in der Kleinen Schmalenau bei km 4,6:  
Sohlschubspannungen im natürlichen Profil (Windungsgrad 1,8) und  
im erodierten Profil des begradigten Baches.

**Abb. 21:** Vergleich des natürlichen Bachbetts mit dem erodierten Bachbett an der Kleinen Schmalenau. Unmittelbar neben dem erodierten Bachbett konnte ein Bachlaufrudiment aus der Zeit vor der Begradigung freigelegt werden.

Die Kiesschichten der meisten kleinen Bäche des Möhne-Einzugsgebietes und vieler anderer Sauerlandbäche sind von Natur aus gering mächtig und liegen auf wasserundurchlässigem Fels des Grundgebirges (bed rock), das meist aus Grauwacke und Tonschiefer besteht. Damit ist auch der Grundwasserkörper klein und kann Niederschlags- und Temperaturschwankungen schlecht abpuffern. Die Quellen dieser Bäche weisen eine geringe Schüttung auf, im Sommer

können Oberläufe bis auf nicht mehr miteinander verbundene Kolke austrocknen. Gewitterschauer lassen diese Bäche plötzlich anschwellen, genauso schnell sinkt der Wasserspiegel wieder.



**Abb. 22:** Zwischen Niederbergheim und Völlinghausen hat sich die Möhne in der Lebenszeit dieser Erle so schnell und stark eingetieft, dass der Baum quasi auf Stelzen steht und die ehemals im Ufer verankerten Wurzeln freigelegt sind.

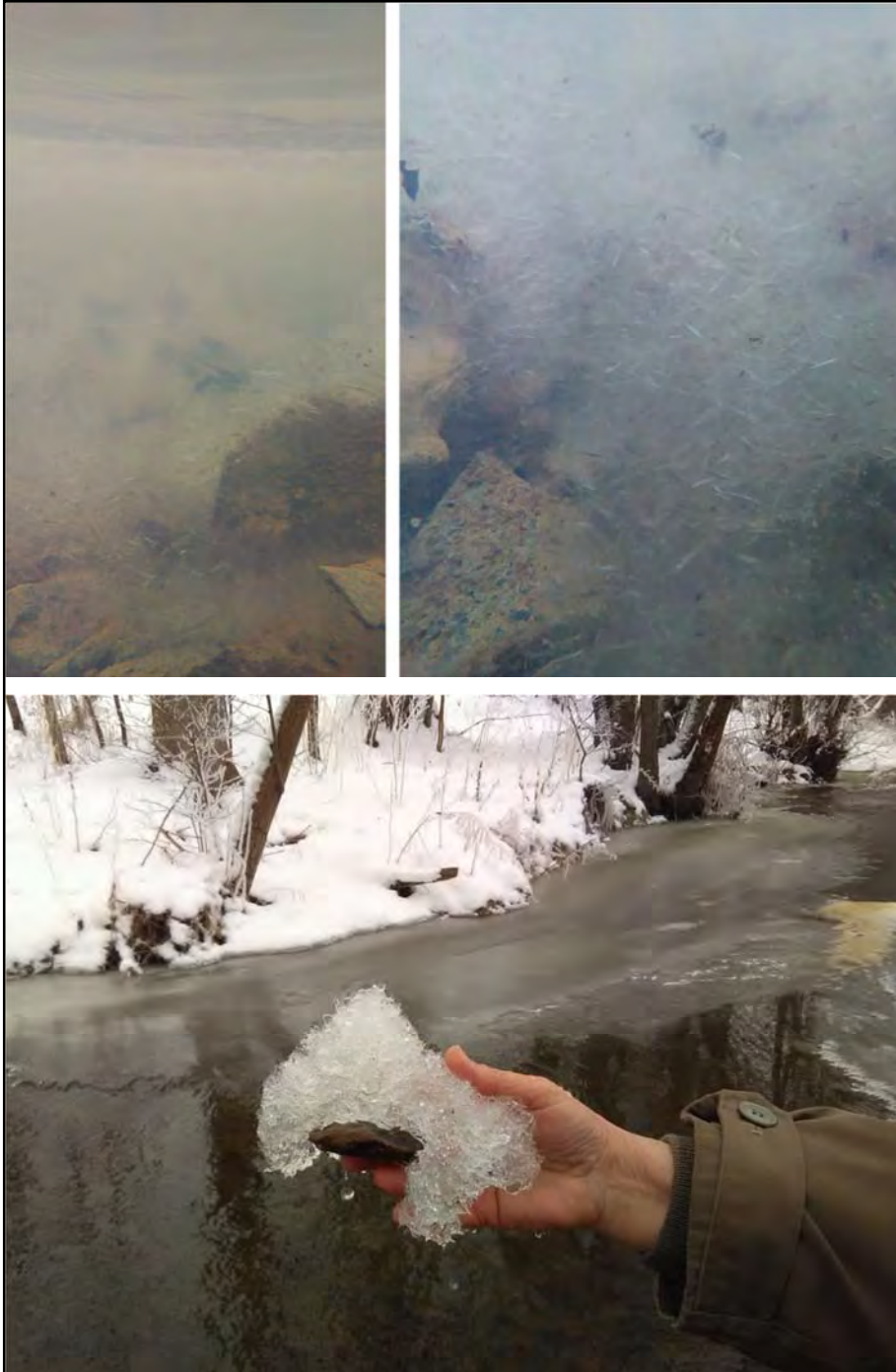
### 2.10 Grundeisbildung als Problem gering mächtiger Kiesschichten

Ein kleiner Grundwasserkörper macht ein Gewässer in kalten, trockenen Wintern anfällig für die Bildung von Grundeis (anchor ice). Dieses Phänomen ist in Skandinavien, Sibirien und Nordamerika wohlbekannt und häufig, nicht aber im wärmeren Mitteleuropa. Hier tritt es nur auf, wenn mehrere Faktoren zusammenkommen:

- Gewässer ohne oder mit beeinträchtigtem Grundwasserkontakt oder mit sehr kleinem Grundwasserkörper im Verhältnis zum Abfluss,
- Vorhandensein von schnellfließenden, turbulenten, flachen Gewässerabschnitten,
- eine länger andauernde Frostperiode, die die fließende Welle auf unter 0 °C herunterkühlt,
- keine geschlossene Eisdecke auf dem Gewässer.

BELTAOS et al. (2000) und ALFREDSSEN & STICKLER (2013) schildern die typischen Vorgänge beim Gefrieren eines nordischen Fließgewässers zu Beginn des Winters: Das Zufrieren beginnt meist mit Randeis (border ice) an ruhigen Uferabschnitten. Bereits eine geringe Unterkühlung des Wasserkörpers von 0,01 – 0,10 °C führt dann zur Bildung von winzigen „frazils“ genannten Eiskristallen. Die in der Strömung mitgeführten Eisnadeln wachsen, kleben zusammen und steigen in strömungsberuhigten Bereichen an die Oberfläche, wo sie eine dünne Schicht von „skim ice“ (deutsch etwa „Rahm-Eis“) bilden. Verhindern Turbulenzen in schnellfließenden Abschnitten (riffles) ein Aufsteigen der Eiskristalle, wird das frazil-Eis im unterkühlten Wasser „aktiv“, d.h. es bleibt wie klebrig an der Gewässersohle, an Totholz oder sonstigen Substraten als

Grundeis hängen. Es kann sich zu amorphen, mit dem Geschiebe verbackenen Gebilden ansammeln und Eisstau (ice jams) bilden, die den Wassersiegel steigen lassen. Im Extremfall kann ein Eisstau einen Gewässerabschnitt nahezu auffüllen und eine Überschwemmung verursachen, ohne dass der Abfluss zugenommen hat.



**Abb. 23:** Grundeis in der Möhne östlich Rüthen am 23.01.2017. oben: Unter Wasser wirkt das Eis wie eine milchig-trübe Flüssigkeit oder ein Brei aus Kristallen. unten: Die „klebrigen“ Eiskristalle verbacken mit dem Kies der Sohle und dringen z.T. auch in das Interstitial ein.

Ausgehend von den Eisdämmen entsteht schließlich eine geschlossene Eisdecke auf der Wasseroberfläche. Im Laufe des Winters schmelzen in der fließenden Welle Teile der Eisstau ab und der Wasserspiegel des Gewässers sinkt allmählich wieder. Neubildung von Grundeis tritt unter der isolierenden Eisdecke nicht mehr auf, insbesondere wenn sie schneebedeckt ist. Eine

Ausnahme stellen eisfreie Abschnitte durch aufquellendes Grundwasser oder die Einleitung von Kühlwässern dar: Flussabwärts solcher Stellen kommt es mitunter wiederholt zu „dynamischer Eisbildung“ (dynamic ice formation) von Unterwasser-Eis (sub-surface ice), also frazil-Kristallen und Grundeis.

Niedrigwasser erhöht die Wahrscheinlichkeit von Grundeis-Bildung (BRADFORD & HEINONEN 2008).

Grundeis dringt auch in die Spalten des Interstitials ein und kann Makrozoobenthos und Jugendstadien von Fischen schädigen. So können Eier und Brut von Salmoniden im Substrat festfrieren oder auch ersticken, wenn Grundeis den Zufluss von sauerstoffreichem Wasser blockiert (BISAILLON et al. 2007). In Alberta war es für die Forellenart *Oncorhynchus clarki* besonders ungünstig, wenn mehrmals Frost-Tau-Wechsel und damit mehrmals Grundeis-Bildung auftraten, so dass die Fische zu häufigeren und längeren Ortswechselln gezwungen waren (BROWN 1999).

Zu den stabilsten Winter-Habitaten für Salmoniden gehören Biberseen, die mit ihren geringen Fließgeschwindigkeiten und fester Eisdecke wenig anfällig für Grundeis sind (BROWN et al. 2011).

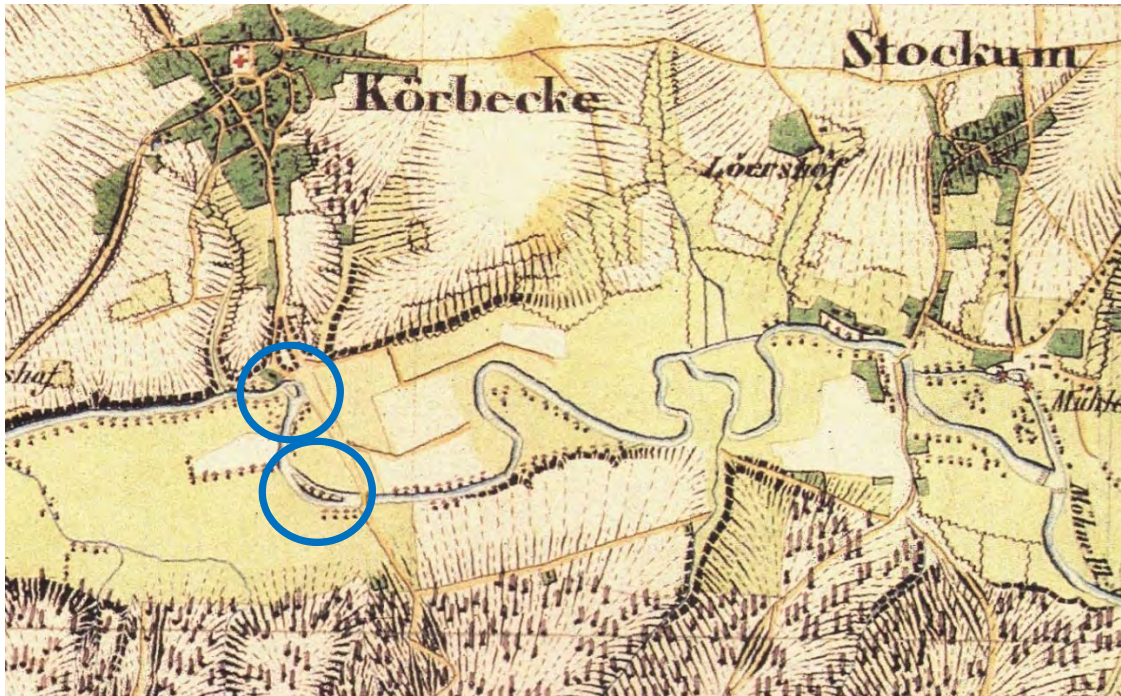
### 2.11 Kurze Geschichte der Gewässer des Möhne-Einzugsgebietes

Die rund 65 km lange Möhne hat an ihrer Mündung ein fast 470 km<sup>2</sup> großes Einzugsgebiet. Die größten Zuflüsse sind Glenne, Wäster (Westerbach) und Heve. Im gesamten Möhne-Einzugsgebiet gehören alle Gewässer zum Forellen- oder Äschentyp (NZO & IfÖ 2007) und sind damit als Bäche zu bezeichnen, obwohl die Barbe als typische Art der „Barbenregion“ selbst oberhalb der Möhnetalsperre vorkommt. Die bisher vorgestellten geo-hydrologischen Abläufe beziehen sich im Wesentlichen auf Flüsse; die Geschichte von Bächen ist weniger gut untersucht. So konnte KASIELKE (2017) für die Ruhr flussabwärts der Mündung der Möhne in Neheim nachweisen, dass die Ruhr hier bis vor ca. 1000 Jahren ein verzweigter Kiesfluss war, dessen Übergang zum Einbettgerinne in Folge der Ablagerung von Auelehm erst im frühen Mittelalter begann. Von der Möhne dagegen wie auch von ähnlich großen oder kleineren Sauerlandbächen liegen keine derartigen Untersuchungen vor.

Nachfolgend werden daher relevante geologische und morphologische Parameter zusammengestellt und Folgen der Ausprägung dieser Parameter diskutiert.

Auf den Karten der Preußischen Uraufnahme der Möhne um 1839 sind an wenigen Stellen noch Verzweigungen bzw. lagestabile Inseln zu erkennen, was den Rest der verzweigten (anabranching) Phase darstellen könnte (Abb. 24).





**Abb. 24:** Ausschnitt aus der Karte der Preußischen Uraufnahme 1839: Auf Höhe von Körbecke (im Bereich der heutigen Möhnetalsperre) sind zwei Verzweigungen bzw. Inseln zu erkennen. Zwischen Körbecke und Stockum befindet sich offenbar der Durchstich eines Mäanders in Vorbereitung.

Die Kiesschichten im Möhne-Einzugsgebiet sind maximal 2,2 m mächtig, an den meisten Stellen jedoch sehr viel dünner. CLAUSEN (1984) und CLAUSEN & LEUTERITZ (1984) geben folgende Beispiele:

- Möhne an der Mündung der Küttelbecke bei Rüthen: 150 cm,
- Möhne zwischen Belecke und Rüthen: 100 – 130 cm,
- Möhne zwischen Mülheim und Belecke: durchschnittlich 100 cm,
- Möhne bei Niederbergheim: bis zu 200 cm,
- Schlagwasser zwischen Kallenhardter Heide und Sudlindenkopf: bis zu 220 cm,
- Glenne oberhalb der Mündung in die Möhne: bis zu 220 cm,
- Heve auf dem MTB Hirschberg: weniger als 100 cm.

Grundeisbildung wurde im Winter 2016/17 am 23.01.2017 an zwei Stellen an der Möhne östlich Rüthen und am 14.02.2017 an der Großen Schmalenau oberhalb Neuhaus zufällig beobachtet sowie in den 1980er Jahren an der Heve bei Wilhelmsruh (eigene Daten).

Die Mächtigkeit der Auenlehmdecke beträgt 0,5 – 2 m (MTB Hirschberg) bzw. 0,5 – 2,5 m (MTB Warstein). Größere Auenlehmdecken bildeten sich auf den beiden genannten MTB nur bei Gewässern mit größeren Talbreiten und ebenen Sohlen wie Möhne, Wäster, Glenne, Lörmecke, Schlagwasser, Biber, Heve, Lottmannshardbach und Schorenbach (CLAUSEN 1984, CLAUSEN & LEUTERITZ 1984). Für die örtliche Mächtigkeit des Auelehms fanden wir nur wenige Werte in der Literatur und ergänzten sie durch eigene Messungen an Uferabbrüchen (Kilometrierung gem. GSK3C LANUV NRW:

- Möhne bei Brilon-Osterhof, km 56,5 bis km 58,3: auf der gesamten Renaturierungsstrecke des Jahres 2016 eine Auelehmbedeckung von ca. 120 – 150 cm auf dem Feinkies (B. SICHERL, Archäologie am Hellweg eG schriftl.),

- Möhne an der Mündung der Küttelbecke bei Rüthen, km 43: 200 cm (CLAUSEN & LAUTERITZ 1984),
- Möhne zwischen Belecke und Rüthen, km 35 bis 43: durchschnittlich 200 cm (CLAUSEN & LEUTERITZ 1984),
- Möhne zwischen Mülheim und Belecke, km 33 bis 35: durchschnittlich 100 cm (CLAUSEN 1984),
- Möhne zwischen Niederbergheim und Völlinghausen (km 24,6 bis 25,1): überwiegend 80 bis 120 cm, lokal jedoch hoch liegende, fluviatile Kiesaufschüttungen, die nicht von Auelehm bedeckt sind.
- Ruhr im Füchtener Bogen (unterhalb der Mündung der Möhne): bis zu 230 cm (KASIELKE 2017),
- Glenne unterhalb der Mündung der Lörmecke, km 2: 80 cm (eigene Daten),
- Wäster zwischen Warstein und Belecke: 100 – 115 cm (BUNZEL-DRÜKE & ZIMBALL 2004),
- Heve auf dem MTB Hirschberg: einige Dezimeter (CLAUSEN 1984),
- Große Schmalenau bei Neuhaus: 30 bis 50 cm (eigene Daten),
- Große Schmalenau bei km 6,0: 50 bis 60 cm.

Die Ablagerung des Auelehms an der Möhne scheint relativ spät erfolgt zu sein: Während der Renaturierung bei Brilon-Osterhof im Jahr 2016 fanden sich in einer vom Auelehm überdeckten Kiesbank in 1,4 m Tiefe Hölzer, von denen eines dendrochronologisch von der Universität Köln auf die Wende 17./18. Jh. datiert werden konnte (B. SICHERL, Archäologie am Hellweg eG schriftl.). Die Möhnesohle befindet sich auf dieser Strecke nicht in der Kiesschicht, sondern im darüber liegenden Auelehm. Dies könnte dadurch zustande kommen, dass um 1700 von der Briloner Hochfläche plötzlich so viel Lehm abgeschwemmt und in der Möhne abgelagert wurde, dass der hier noch kleine Bach sein Bett nicht freihalten konnte – oder dass die Möhne z.B. im Rahmen des Straßenbaus verlegt wurde.

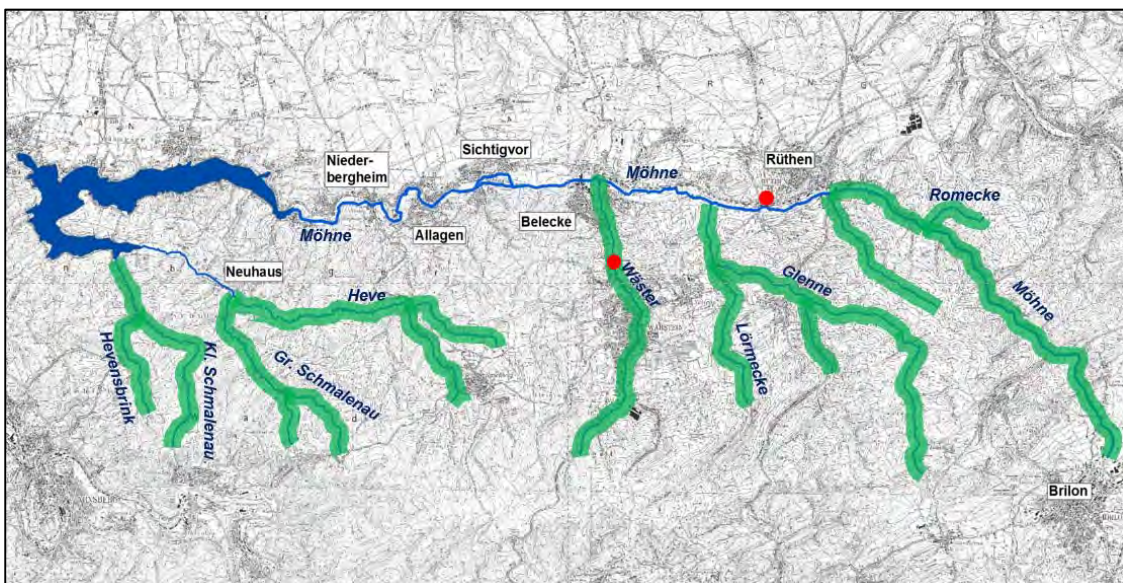
Auf Höhe von Rüthen wurde 2016 unter dem Auelehm ein hölzernes „Paddel“ gefunden, das wahrscheinlich von einer frühmittelalterlichen Mühle stammt (Abb. 25).



**Abb. 25:** Holzernes Objekt aus der Möhne bei Rüthen, gefunden unter dem Auelehm (MENNE & MÜLLER, LWL schriftl.): wahrscheinlich Mühlradschaufel einer frühmittelalterlichen Wassermühle (Zeichnung: Rekonstruktion der Wassermühle von Dasing aus dem 8. Jahrhundert, [www.steinhauer-inntal.de/geschichte/](http://www.steinhauer-inntal.de/geschichte/))

Vor der Ablagerung des Auelehms existierten in den Tälern der Möhne und einiger ihrer Zuflüsse kleine Moore, wie verschiedene Funde von Torfschichten zeigen. Die Auslöser der Moorbildung können Biberstauung gewesen sein.

Noch im Mittelalter war der Biber in Mittelwestfalen weit verbreitet (FELDMANN 1984) und noch gegen Ende des 16. und zu Anfang des 17. Jahrhunderts an der Ruhr unterhalb von Neheim nicht allzu selten, danach setzte allerdings auch hier ein erheblicher Rückgang der Bestände durch Übernutzung bzw. Bekämpfung ein. So zitiert BECHSTEIN (1801) SEETZEN aus einer Veröffentlichung vom Ende des 18. Jahrhunderts: „In der Lippe halten sich viel Biber auf; für Deutschland immer eine naturhistorische Seltenheit“. Erst vom Beginn des 19. Jahrhunderts liegen einige Berichte von Vorkommen des Bibers an der Möhne vor, insbesondere zwischen Völlinghausen und der Mündung in die Ruhr und von den Nebenbächen Heve und Aupke. Der letzte Nachweis in Westfalen vor der Ausrottung war wahrscheinlich ein 1868 zwischen Niederense und Neheim geschossenes Tier (FELDMANN 1984).



**Abb. 26:** Größere Gewässer des Möhnesystems, an denen einst vermutlich dauerhafte (nicht nur saisonale) Biberdämme existierten (rot: subfossile Bibernachweise)

Begradigungen von Gewässern v.a. im 19. und 20. Jahrhundert und die darauf folgende Tiefenerosion haben an mehreren Stellen im Untersuchungsgebiet den Kies im Gewässerbett schon komplett abgetragen, z.B. an den folgenden Bachabschnitten (eigene Beobachtungen):

- Heve unterhalb der Mündung der Großen Schmalenau,
- Heve auf Höhe des Campingplatzes Wilhelmsruh,
- Kleine Schmalenau oberhalb Grüne Hoffnung.

Zwei weitere derartige Stellen wurden durch Maßnahmen des LIFE-Projektes „Bäche im Arnsberger Wald“ wieder naturnah gestaltet:

- Große Schmalenau oberhalb der Mündung in die Heve,
- Kleine Schmalenau oberhalb der Mündung des Hevensbrink.

Und selbst die Ruhr zeigt(e) an mehreren Ausleitungsstrecken freiliegende Felsrippen, z.B.

- Stirnbergkurve bei Alt-Arnsberg,
- Sportplatz Arnsberg-Bruchhausen (nach Renaturierung heute wieder mit Kies bedeckt),

- zwischen Echthausen und Wickede (nach Renaturierung heute wieder mit Kies bedeckt),
- am Behringhof bei Wickede.

Noch bis in die 1980er Jahre wurden an verschiedenen Stellen die Ufer von Möhne und Heve befestigt, um Uferabbrüche und damit die laterale Verlagerung zu unterbinden. Dabei kam es meist auch zu einer Einengung des Flussbettes, was der Tiefenerosion weiteren Vorschub leistete.



**Abb. 27:** Befestigung eines Uferabbruches an der Heve bei Wilhelmsruh 1988



**Abb. 28:** Noch im Jahr 2008 wurde auf einem kurzen Abschnitt des Lottmannshardbaches – des Oberlaufes der Heve – Kies aus dem Bachbett geschoben und auf den Ufern abgelagert.

An der Heve bei Sankt Meinolf und auch mitten im Arnsberger Wald westlich von Neuhaus wurde noch in den 1980er Jahren Kies aus dem Gewässerbett herausgeschoben und auf den Ufern deponiert oder für Baumaßnahmen (z.B. für den Waldwegebau) abtransportiert. Seit dieser Zeit hat die Einschnittstiefe dieser Gewässerabschnitte spürbar zugenommen, was an der „wachsenden“ Höhe der Steilufer deutlich wird (Abb. 29). Die bisher letzte derartige Aktion fand im Jahr 2008 statt (Abb. 28), wurde aber wenig später rückgängig gemacht.



**Abb. 29:** An einem Steilufer der Heve bei Sankt Meinolf ist das Ausmaß der Sohlerosion ablesbar. Die Gewässersohle liegt heute ca. 3 m unter dem Niveau der Aue.

Erste Maßnahmen zur Renaturierung erfolgten in den 1990er Jahren.

Umfangreiche Maßnahmen zur Renaturierung der Möhne und zur Verbesserung ihrer Durchgängigkeit konnten im Rahmen des LIFE-Projektes „Möhneaue“ von 2010 bis 2016 umgesetzt werden. Träger des Projektes war der Kreis Soest, Projektpartner u.a. die ABU.

Näheres siehe unter [www.moehne-life.de](http://www.moehne-life.de).

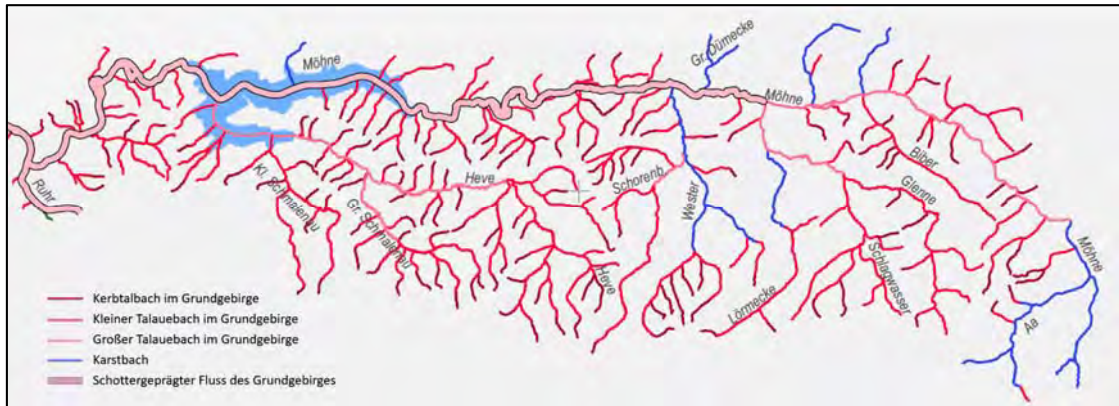
Von 2009 bis 2014 führte die ABU das LIFE-Projekt „Bachtäler im Arnsberger Wald“ durch (DRÜKE et al. 2016; ABU 2014)). Begradigte Abschnitte u.a. der Heve, der Großen Schmalenau und der Kleinen Schmalenau wurden renaturiert und undurchlässige Querbauwerke umgestaltet.

Näheres siehe unter [www.life-bachtaeler.de](http://www.life-bachtaeler.de).

Zahlreiche weitere Maßnahmen wurden seitdem umgesetzt.

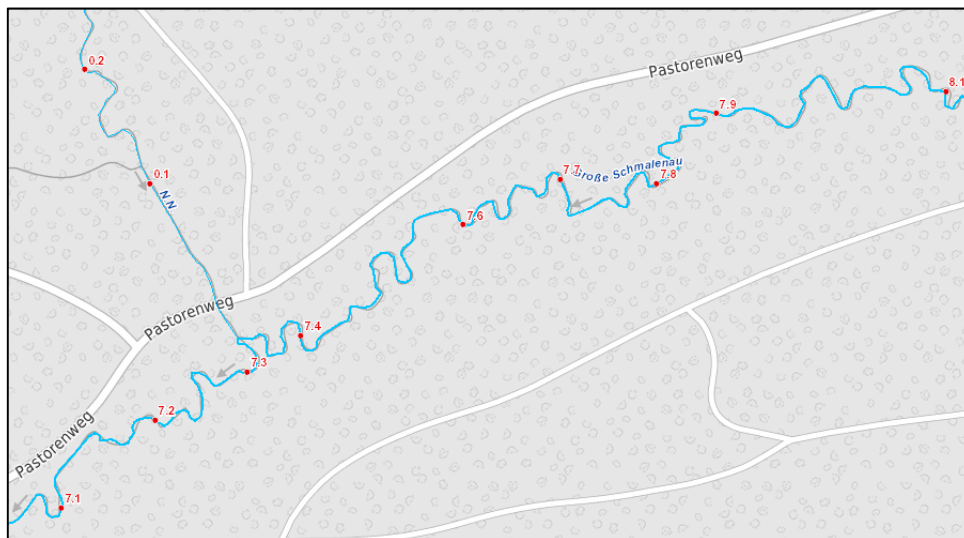
## 2.12 Typologie

Abb. 30 gibt einen Überblick über die NRW-Gewässertypen des Einzugsgebietes der Möhne (LANUV 2002), Tabelle 1 über die Fischgewässertypen.



**Abb. 30:** NRW-Gewässertypen im Einzugsgebiet der Möhne (LANUV 2015)

Kleiner und Großer Taluebach und die Möhne („schottergeprägter Fluss des Grundgebirges“) mäandrieren natürlicherweise, siehe beispielhaft Abb. 31. Die Windungsgrade liegen zwischen 1,5 und 2,0. Windungsgrade unter 1,5 erwiesen sich in allen Fällen nach näherer Prüfung als anthropogen bedingt (siehe ausführlich unter Nr. 4.3).

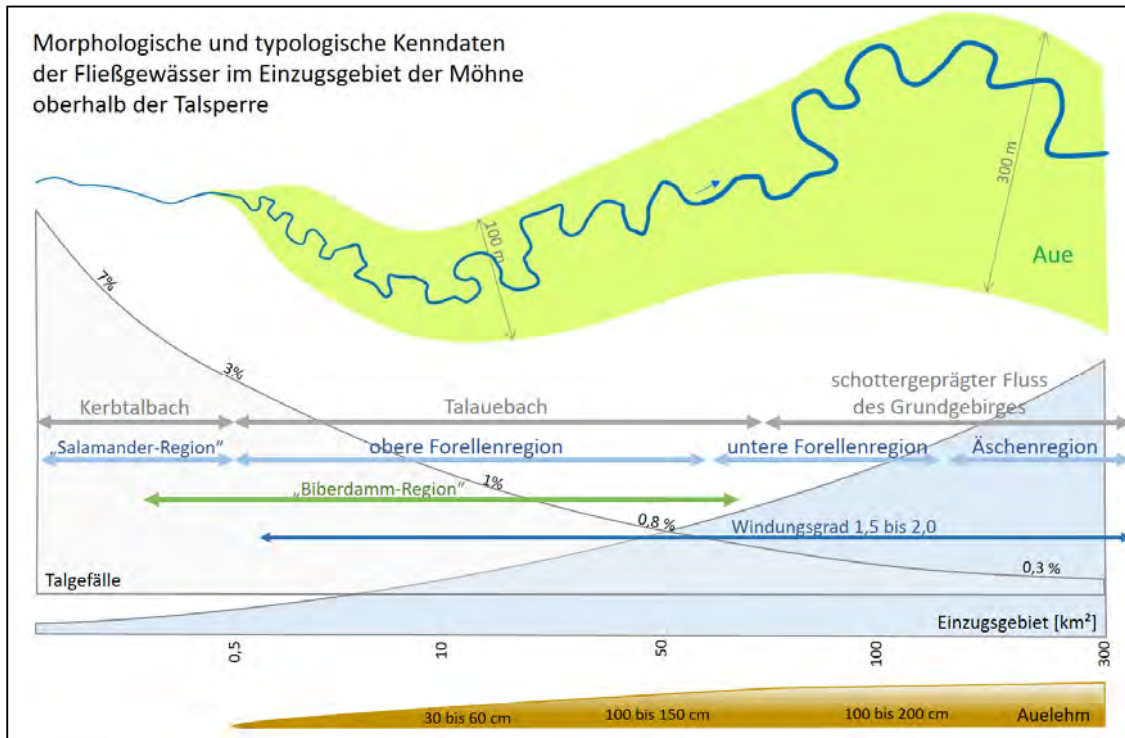


**Abb. 31:** Beispiel für eine natürliche Laufentwicklung, hier an der Großen Schmalenau zwischen km 7,1 bis 8,1 mit einem Windungsgrad von 1,8.

**Tab. 1:** Fischgewässertypen im Einzugsgebiet der Möhne

Fischgewässertyp	Beispiele	Talgefälle [%]
Oberer Forellentyp Mittelgebirge FiGt01 „obere Forellenregion“	Biberbach	2,0 – 1,0
	Kleine Schmalenau	2,6 – 1,3
	Große Schmalenau	3,0 – 1,3
	Glenne oh Mdg. Schlagwasser	3,0 – 1,0
Unterer Forellentyp Mittelgebirge FiGt02 „untere Forellenregion“	Glenne uh Mdg. Schlagwasser	0,9 – 0,4
	Heve	0,7 – 0,6
	Möhne oh Mdg. Wäster	0,6 – 0,4
Äschentyp Mittelgebirge FiGt09 „Äschenregion“	Möhne uh Mdg. Wäster	0,4 – 0,3

Abbildung 30 gibt einen schematischen Überblick über morphologische Kenndaten und typologische Einordnungen der Fließgewässer im Einzugsgebiet der Möhne oberhalb der Talsperre.



**Abb. 32:** Morphologische Kenndaten und typologische Einordnungen der Fließgewässer im Einzugsgebiet der Möhne oberhalb der Talsperre.

### 2.13 Kernaussagen zum Verständnis von kiesführenden Gewässern des Mittelgebirges

- Kies entsteht fast ausschließlich durch Frostsprengungen an vegetationslosen Felsen.
- Außerhalb der Hochgebirge wird Kies in nennenswertem Umfang nur während der Eiszeiten gebildet.
- In Warmzeiten tragen Flüsse und Bäche vorhandene Kiesvorräte allmählich ab; dieser natürliche Prozess hat sich durch menschliche Eingriffe sehr stark beschleunigt.
- Vor dem Mittelalter waren kiesführende Bäche und Flüsse des Sauerlands ab der Äschenregion überwiegend „verflochtene“ Gewässer - mehrarmige, sich oft verändernde Gerinne mit zahlreichen aus dem Wasser ragenden Sedimentbänken in nahezu (überwiegend?) vegetationslosen Kiesebenen.
- Die Forellenregion der meisten Mittelgebirgsbäche war im natürlichen Zustand von einem Mosaik aus Biberteichen und frei fließenden, meist mäandrierenden Abschnitten geprägt.
- Die im Mittelalter beginnende starke Entwaldung im Sauerland verursachte Ablagerungen von Auelehm, die die verflochtenen Gewässer in mäandrierende, relativ lagestabile Einbettgerinne verwandelten.

### 3 Eigenschaften kiesgeprägter Gewässer des Mittelgebirges

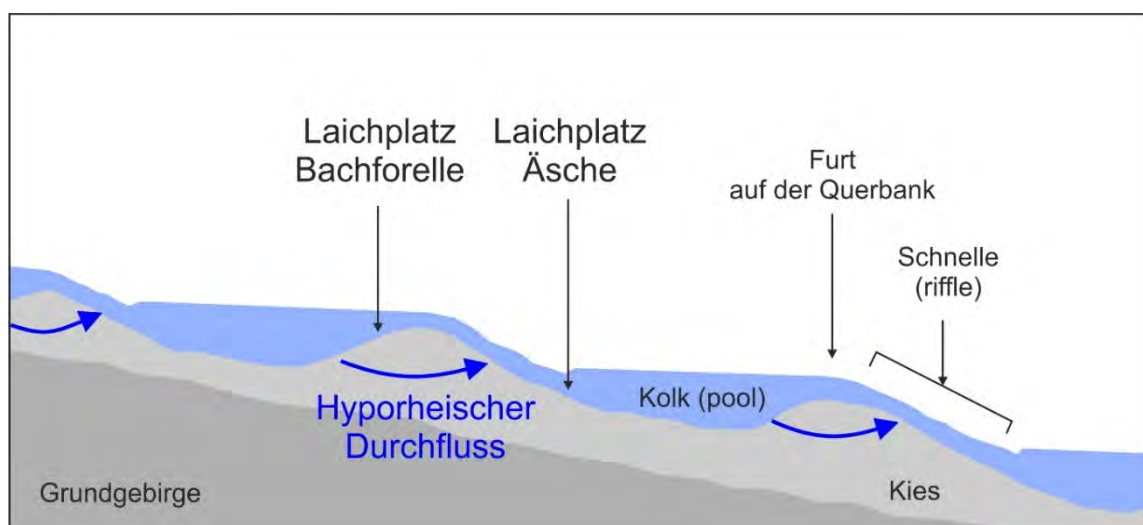
#### 3.1 Anordnung des Kiesel im Längsverlauf der Gewässer

In Kies führenden Gewässern mit einem Gefälle von weniger als 0,02 kommt es zur Ausbildung vertikaler welliger Sohlstrukturen aus Kies, die Furten oder Schnellen (riffles) und Kolke (pools) genannt werden (KNIGHTON 1998) und analog zu vertikalen Mäandern sind (KELLER & MELHORN 1978). Das Sohlsubstrat in den Kolken ist feinkörniger als das in den Furten.

KERN (2016) beschreibt, dass bei niedrigen und mittleren Abflüssen über den Schnellen höhere Fließgeschwindigkeiten herrschen als in den Kolken. Mit steigenden Abflüssen gleichen sich die Geschwindigkeiten an und erreichen schließlich in den Kolken höhere Werte als in den Schnellen. Für den Geschiebetransport bedeutet dies, dass bei Hochwasser auf den Furten eher Ablagerungen stattfinden, während die Pools ausgekolkt werden. Bei ablaufendem Hochwasser werden dann die in den Schnellen deponierten feineren Substrate ausgewaschen und in den Kolken abgelagert (s. auch WOHL 2014).

Kiestransport in nennenswertem Umfang findet nicht bei jedem Hochwasser statt, sondern pulsartig bei Abflüssen, die oft deutlich über dem mittleren jährlichen Hochwasser liegen, also nur im Abstand von mehreren Jahren oder sogar Jahrzehnten vorkommen. Dazu trägt auch das Phänomen der Deckschichtbildung bei; das ist die Anreicherung der größten transportierten Kieskörner auf der obersten Sohlenschicht durch Auswaschung kleinerer Körner. Das Aufreißen dieser Deckschicht erfordert hohe Sohl Schubspannungen und setzt schlagartig große Kiesmengen frei (KERN 2016). Im Einzugsgebiet der Möhne war das Hochwasser im August 2007 ein solches Ereignis.

Furten und Kolke treten typischerweise als Sequenzen mit einer relativ großen Regelmäßigkeit auf. Als Abstand zwischen zwei Furten bzw. zwei Kolken wird im Mittel die fünf- bis siebenfache Sohlbreite angenommen (LEOPOLD et al. 1964, GREGORY et al. 1994). Nach der Beseitigung von Furt-Kolk-Sequenzen z.B. durch Ausbau oder starke Kieszugabe entstehen diese Strukturen meist wieder neu (GREGORY et al. 1994, BREW et al. 2015), wobei die Breitenvariation des Gewässers den größten Einfluss auf die Lage der Furten und Kolke hat (NELSON et al. 2015).

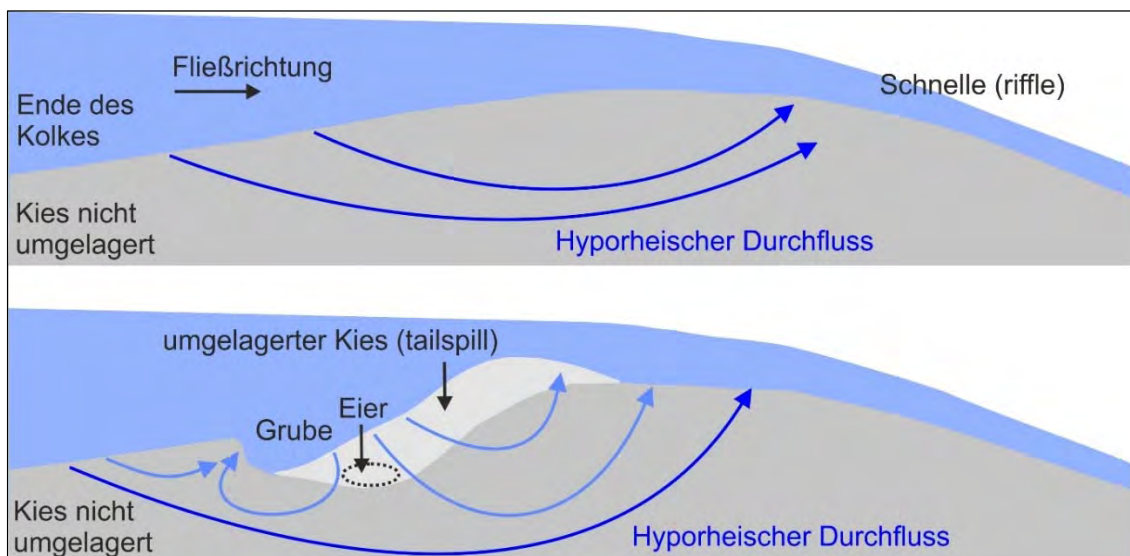


**Abb. 33:** Schematischer Längsschnitt durch einen Bach mit Kiessohle und einer natürlichen Abfolge von Querbänken (riffles) und Kolken (pools).



Die Bedeutung der Furten und Kolke als Habitate wird u.a. in einer Untersuchung von Fischen deutlich: diesjährige (0+) Bachforellen und Groppen hielten sich bevorzugt in flach überströmten Furten auf, Elritzen und ältere Forellen in Kolken, während Schmerlen keine Vorliebe zeigten (ROUSSEL & BARDONNET 1997).

Besonders wichtig sind pool-riffle-Sequenzen für die Fortpflanzung von Salmoniden, also Lachsen und Forellen, sowie von Äschen. Salmoniden legen ihre Laichgruben (spawning pit, redd) an solchen Stellen im Kies an, an denen die Gewässersohle aus dem Kolk zur Furt (riffle crest) hin ansteigt, dem „pool tail“ oder „riffle head“. Hier verursacht die Form der Sohle eine Durchströmung der Kiesbank (hyporheic flow). Die Fische heben mit der Schwanzflosse eine Grube aus und legen die Eier darin ab. Das Ausschlagen einer neuen Grube direkt bachaufwärts des Geleges bedeckt die Eier mit lockerem Kies (tailspill, also vom Schwanz bewegtes Material). Die Form des tailspill verbessert die Durchströmung und damit die Sauerstoffversorgung im Kies (TONINA & BUFFINGTON 2009, Abb. 34). Äschen dagegen legen ihre Laichgruben dort an, wo die Rausche wieder in einen Kolk übergeht, also auf der anderen Seite der Furt (downstream end of pool = riffle tail) (FABRICIUS & GUSTAFSON 1955).



**Abb. 34:** Schematischer Längsschnitt durch einen Kolk-Furt-Übergang ohne und mit Laichgrube einer Forelle (verändert nach TONINA & BUFFINGTON 2009); hellblaue Pfeile: hyporheischer Durchfluss induziert durch die Struktur der Laichgrube; tailspill: von der Forelle beim Schlagen der Laichgrube mit dem Schwanz umgelagerter Kies

### 3.2 Interstitial

Vom Wasser durchströmte Kiese (Kieslückensystem = Interstitial) sind für einen großen Teil der Gewässerorganismen ein wichtiger Lebensraum (z.B. BINDER & PATT 2016). Gefährdet ist er durch Feinsedimente, die das Kieslückensystem verstopfen, und durch Sohlerosion infolge von Begradigungen (siehe ausführlicher ABU 2020).

### 3.3 Einfluss von Totholz (woody debris, instream wood)

Sturzbäume strukturieren das Gewässerbett, verursachen Seitenerosion und mobilisieren dadurch den Talkies, sind Ursache für lokale Umlagerung von Kies in der Gewässersohle auch bei Abflüssen, die keine bettbildenden Ausmaße erreichen und reaktivieren damit das Interstitial durch Kieswäsche.

Großes Totholz kann Auslöser von Verklausungen (log jams) sein, die u.a. eine unnatürliche Sohleintiefung bremsen können (z.B. LINSTED & GURNELL 1999).

Im Einzugsgebiet der Möhne sind solche Verklausungen nach eigenen Erfahrungen allerdings sehr seltene Ereignisse. Infolge des extremen Hochwassers im Arnsberger Wald am 9.8.2007 entstanden im Einzugsgebiet der Heve an einigen Stellen große Totholzansammlungen, die aber schon nach wenigen Jahren durch natürliche Vorgänge vollständig aufgelöst waren.



**Abb. 35:** Neu entstandene Längsbank hinter einem Unterströmungskolk an der Möhne westlich Beleck („Fliegenwald“)

Die im Einzugsgebiet der Möhne heute vorhandene Häufigkeit und Menge insbesondere von großem Totholz in den Bächen und in der Möhne ist weit geringer als unter natürlichen Bedingungen. Ursache sind vorrangig nicht Unterhaltungsmaßnahmen, sondern das verbreitete Fehlen von alten und sehr alten Laubbäumen entlang der Ufer. So waren bis Mitte der 2000er Jahre weit mehr als die Hälfte der Bachauen im Einzugsgebiet der Heve mit Fichtenforsten bestockt, unter denen kaum großes Totholz in die Bäche eingetragen wird.

Eine erste Maßnahme zur Reduzierung der Fichtenforste zugunsten der Entwicklung standortheimischer Auwälder, dominiert von Erlen und Stieleichen, führte das Lehr- und Versuchsforstamt Arnsberger Wald auf Anregung der ABU im Jahr 2006 in der Heveaue östlich von Neuhaus durch. Am 18. Januar 2007 warf dann der Orkan „Kyrill“ in der Heveaue einen großen Teil der Fichtenbestände; noch stehende Fichten wurden mit den geworfenen in 2007 weitgehend geräumt. Insbesondere entlang der Großen und Kleinen Schmalenau wurden im Rahmen des LIFE-Projektes „Bachtäler im Arnsberger Wald“ von 2009 bis 2014 in erheblichem Umfang Fichtenforste entnommen. Schließlich ließ in den Jahren 2019 und 2020 die große Fichtenkatastrophe, verursacht durch Dürre und Borkenkäfer, nahezu alle Fichtenforste absterben.



**Abb. 36:** Die Große Schmalenau bei km 6,5 im Jahr 2009 vor der Entnahme der Fichten im Rahmen des LIFE-Projektes „Bachtäler im Arnsberger Wald“. Fichtenforste liefern kaum größeres Totholz. Das Bachbett macht einen „sauberen“ Eindruck.



**Abb. 37:** Die Große Schmalenau bei km 6,15 im Jahr 2016. In diesem wenige Jahrzehnte alten Erlenbestand konkurrieren sich die Bäume noch aus und es fällt viel Totholz an, das sich im Bach verkeilt. Es dominiert ein vielfältiges Chaos aus Stämmen, Ästen, Laub.

### **3.4 Lithophile Fische und Rundmäuler in den Gewässern des Rheinischen Schiefergebirges**

#### **3.4.1 Überblick über die Arten und ihre Biologie**

Im Mittelgebirge von Sauerland, Siegerland, Wittgensteiner Land und Eifel, also den Landschaften des Rheinischen Schiefergebirges in Nordrhein-Westfalen, sind Referenzfischfaunen für vier Fischgewässertypen der Bäche und kleinen Flüsse beschrieben (NZO & IfÖ 2007): FiGt 01 (oberer Forellentyp Mittelgebirge), 02 (unterer Forellentyp Mittelgebirge), 09 (Äschentyp Mittelgebirge) und 10 (oberer Barbentyp Mittelgebirge). Diese vier Fischgewässertypen decken zusammen 38,4 % des landesweiten Fischgewässertypennetzes ab.

Die Referenzfaunen, Tabelle 2, umfassen insgesamt 28 Fisch- und Rundmaularten, die in Tabelle xx aufgelistet sind. 13 von ihnen sind lithophil. Lithophil, also „steinliebend“, bezeichnet eine Reproduktionsgilde, deren Mitglieder auf Kies oder anderen Steinen im strömenden Wasser ablaichen. Die lithophilen Arten sind auch außerhalb der Laichzeit im Süßwasser entweder komplett oder in den meisten ihrer Altersstadien rheophil, also strömungsliebend.

In allen vier Referenzfaunen sind über die Hälfte der zu erwartenden Individuen lithophil; diese Gilde und damit der Kies spielen eine zentrale Rolle für die Fischfauna der Mittelgebirge.

Eine Ausnahme ist hier die Groppe. Sie stellt in den Referenzen der Forellenregion etwa ein Drittel aller Individuen, ist aber nicht lithophil: Das Weibchen klebt die Eier an die Decke der Wohnhöhle des Männchens, welches dann die Brut bewacht. Somit ist die Art nicht von Kiesbänken abhängig.

**Tab. 2:** Referenzfischfaunen der Fischgewässertypen des Rheinischen Schiefergebirges

Fisch- oder Rundmaulart	Fischgewässertypen der Mittelgebirgsbäche und -flüsse im Rhein. Schiefergebirge			
	oberer Forellentyp FiGt 01	unterer Forellentyp FiGt 02	Äschentyp FiGt 09	oberer Barbentyp FiGt 10
Forelle (Bach- / Meerforelle)	64,6	51,0	11,6	5,0
Groppe	29,9	34,1	16,0	7,0
Schmerle	2,5	4,5	10,5	10,2
Elritze	1,5	2,0	13,5	13,0
Bach- / Flussneunauge	1,5	0,9	2,0	2,0
Döbel		2,5	12,5	7,5
Lachs		2,5	2,5	0,5
Äsche		1,5	7,5	3,0
Hasel		1,0	4,5	7,5
Barbe			2,7	9,8
Nase			2,2	7,2
Meerneunauge			1,5	1,5
Schneider			0,5	0,5
Gründling			3,5	4,9
Dreistachliger Stichling			2,8	2,0
Flussbarsch			1,7	3,5
Rotauge			1,7	3,5
Ukelei			1,7	4,9
Kaulbarsch			0,5	2,5
Quappe			0,5	1,4
Aal			0,1	0,1
Steinbeißer				1,5
Brachsen				0,3
Hecht				0,3
Aland				0,2
Güster				0,1
Schleie				0,1
	100,0	100,0	100,0	100,0
<b>Anteil Lithophiler</b>	<b>67,6</b>	<b>61,4</b>	<b>61,0</b>	<b>57,7</b>




Tabelle 3 gibt einen Überblick über Laichverhalten und Laichhabitat der lithophilen Arten des Rheinischen Schiefergebirges aus Tabelle 2. Alle aufgelisteten Arten nutzen Laichplätze in schnell fließendem, relativ flachem Wasser. Mit Ausnahme von Fluss- und Meerneunauge, deren Laichplätze v.a. eine starke Strömung aufweisen müssen, benötigen die Arten explizit Flachwasser, z.B. die Barbe sehr flaches, schnell fließendes Wasser in Schnellen („very shallow, fast flowing waters, in riffles“) oder Hasel und Nase flach überströmte Kiesbänke („shallow gravel beds“, KOTTELAT & FREYHOF 2007).

Kieslaicher lassen sich nach BALON (1975, s. auch PULG 2009) in zwei Gruppen einteilen, die unterschiedliche Ansprüche an das Substrat stellen:

- Arten, die ihre Eier an der Oberfläche des Kieses absetzen („open substratum spawners“ oder Oberflächen-Deponierer) sind obligatorische und fakultative Kieslaicher;
- Arten, die ihre Eier im Interstitial „verstecken“ („brood hiders“ oder Brutverstecker) sind alle obligatorische Kieslaicher.

**Tab. 3:** Lithophile Fisch- und Rundmaularten der Referenzfischfaunen des Süderberglandes, geordnet nach dem Beginn ihrer Laichzeit (nach Angaben aus KOTTELAT & FREYHOF 2007, JUNGWIRTH et al. 2003, KRAPPE et al. 2012, BLESS 1992, KEELEY & SLANEY 1996, WÜSTEMANN & KAMMERAD 1995 sowie aus der Zusammenstellung der Habitatsprüche der Fischarten NRWs ([www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/anhang\\_iv.3\\_habitatansprueche\\_fische\\_teil1.pdf](http://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/anhang_iv.3_habitatansprueche_fische_teil1.pdf)))

Art	Jahreszeit und Temperatur												Laichhabitat				
	Laichzeit (Monate)												Wassertiefe [cm]	Fließgeschw. [cm/s]	Korngröße Kies [mm]	Ort der Ei-Entwicklung	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					Wasser-temperatur
Lachs													< 11 °C	(15) 30 - 60	30 - 100	15 - 30	Kies (Eier vergraben)
Bachforelle													< 8 °C		> 40	(10) - 50 - (70)	Kies (Eier vergraben)
Meerforelle													< 8 °C		> 40	10 - 70	Kies (Eier vergraben)
Äsche													> 4 - 8 °C	20 - 50	33 - 80	20 - 70	Kies (flache Laichgrube, Eier etwas vergraben)
Aland													> 10 °C		30 - 40 (100)		Kies oder Wasserpflanzen
Hasel													> 8 - 10 °C	15 - 40	20 - 50	30 - 250	Kies, Steine (Oberfläche oder flache Laichgrube)
Nase													> 12 °C	(15) 20 - 30	40 - 60 (120)	(15) 20 - 70 (100)	Kies (flache offene Laichgrube)
Bachneunauge													> 9 °C	20 - 30	(5) 10 - 40	3 - 20 (30)	Mittelsand / Feinkies (flache offene Laichgrube)
Flussneunauge													> 9 °C		20 - 80 (95)		Kies (flache offene Laichgrube)
Elritze													> 10 °C		20 - 30	20 - 30	Kies (Eier tief im Lückensystem)
Meerneunauge													> 15 °C	40 - 60	100 - 200	10 - 50	Kies (flache offene Laichgrube)
Barbe													> 14 - 16 °C	20 - 30 (75)	(25) 30 - 50	20 - 50 (250)	Kies (flache offene Laichgrube)
Schneider													> 12 °C		10 - 50	30 - 250	Kies (Eier tief im Substrat)
Döbel													> 14 °C		(5) 20 - 50	(2) > 5 - 80	Kies, Oberfläche; selten Pflanzen

-  obligate Kieslaicher: "Brutverstecker"
-  obligate Kieslaicher: "Oberflächen-Deponierer"
-  fakultative Kieslaicher

Die erste Artengruppe („Oberflächen-Deponierer“) stellt keine besonders hohen Ansprüche an Korngröße, Mächtigkeit und Durchströmung der Kiesbänke, da die Eier auf den frei liegenden Steinen anhaften oder oberflächlich zwischen den Steinen zum Liegen kommen. Die Neunaugen, Nase und Barbe legen flache Laichgruben an, jedoch ohne die Eier mit Kies zu bedecken. Döbel, Hasel sowie Aland verändern die Oberflächen der Kiesbänke meist nicht (KOTTELAT & FREYHOF 2007, JUNGWIRTH et al. 2003, WÜSTEMANN & KAMMERAD 1995).

Die Fische der zweiten Artengruppe („Brutverstecker“) benötigen – bis auf die Äsche - Kiesbänke mit Mächtigkeiten von etwa 30 cm oder mehr. Die tief im Sediment liegenden Eier sind darauf angewiesen, dass die Lücken im Interstitial groß genug und nicht von Feinsedimenten verstopft sind sowie von der Strömung mit Sauerstoff versorgt werden. Von den Arten der Lippe gehören nach JUNGWIRTH et al. (2003) die Salmoniden, Äsche und Elritze in diese ökologische Gruppe.

Bachforellen präferieren zum Ablachen Kiesbänke mit Korngrößen von ca. 50 mm in einer Wassertiefe von ca. 30 cm mit einer Strömung von ca. 40 cm/s (Jungwirth et al. 2003); typischerweise führt am Laichplatz die Strömung in die Kiesbank hinein (KOTTELAT & FREYHOF 2007). Die weiblichen Forellen vergraben ihre Eier abhängig von der Größe der Fische 4 – 18 cm tief im Kies. Durch die Laichtätigkeit werden Feinsedimente ausgewaschen (JUNGWIRTH et al. 2003). Das tiefe Vergraben schützt die Eier vor Umlagerungen der Kiesbänke durch Hochwasser, macht sie aber anfällig für Sauerstoffmangel und Verschmutzung (KOTTELAT & FREYHOF 2007). Von der Laichzeit im November/Dezember bis zum Erscheinen der Jungfische im Frühjahr (April/Mai) verbleiben Eier und Brut während ihrer Entwicklung mehrere Monate im Inneren der Kiesbank. Während dieser langen Zeit im Sediment müssen die Bedingungen im Interstitial durchgehend günstig sein. Dieselben Ansprüche an ihre Laichplätze wie die Bachforelle stellen Lachs und Meerforelle.

Die Äsche legt ihre flachen Laichgruben im März/April dort an, wo die Mächtigkeit einer Kiesbank mit Korngrößen von 20 – 70 mm mindestens 5 - 10 cm beträgt, die Wassertiefe um 35 cm und die Fließgeschwindigkeit etwa 40 cm/s. Teilweise werden alte Bachforellenlaichplätze genutzt (JUNGWIRTH et al. 2003). Die Eier schlüpfen schon nach 10 bis 40 Tagen; danach bleiben die Larven noch vier bis 10 Tage im Interstitial, bis der Dottersack aufgezehrt ist (KOTTELAT & FREYHOF 2007). Die Entwicklungszeit der Äsche im Interstitial ist damit wesentlich kürzer als die der Bachforelle. Dies und die Tatsache, dass die Eier weniger tief eingegraben werden, verringert die Gefahr des Sauerstoffmangels. Wegen der Laich- und Entwicklungszeit im Frühjahr besteht jedoch eine größere Gefahr durch eine Veralgung von Kiesbänken.

Elritzen heben keine Laichgruben aus, geben ihre Eier aber tief in das schützende Kieslückensystem ab. Bevorzugt wird Kies mit einem Durchmesser von 2 - 3 cm. Embryonal- und Larvalentwicklung finden im durchströmten Interstitial statt, wobei die Larven nach dem Schlüpfen bis 30 cm tief in das Lückensystem eindringen. Vom Ablachen, das zwischen April und Juli mehrfach erfolgen kann, dauert die Entwicklungszeit im Kies je nach Wassertemperatur 13 – 24 Tage (alle Angaben aus BLESS 1992).

Laichende Schneider pressen ihre Eier tief in Substratlücken des Kiesel. Für die Fische dann noch erreichbare Eier werden entweder gefressen oder tiefer in den Kies geschoben. Bei 18 – 19 °C Wassertemperatur schlüpfen die Eier des Schneiders nach sechs bis sieben Tagen. Die Larven verbleiben einige Tage im Interstitial (BLESS 1996, BREITENSTEIN & KIRCHHOFER 1999).

### 3.4.2 Kolmation von Kiesbänken

Vor allem die Brutverstecker unter den Kieslaichern sind auf ein offenporiges, gut durchströmtes Kieslückensystem angewiesen, damit ihre Eier oder Larven genug Sauerstoff erhalten. Die

Mobilisierung von Feinsedimenten z.B. von unbewachsenen Äckern stellt eine große Gefahr dar. In Nordamerika sind die Auswirkungen von Kahlschlägen auf die Gewässer dort gut untersucht (z.B. HICKS 2002): Feinsedimenteinträge verstopfen das Interstitial von Kiesbänken, wobei die Überlebensrate von Salmoniden-Eiern und -Larven mit zunehmender Sedimentmenge sinkt. Im Extremfall kann der Kies so verbacken, dass es adulten Fischen unmöglich ist, Laichgruben zu schlagen. Rutschungen entblößter Hänge können außerdem zu plötzlichen katastrophalen Sedimenteinträgen führen, die kleine Gewässer komplett verschütten, so dass das Wasser nicht mehr oberirdisch, sondern nur durch die zugedeckte Kiesschicht fließt.



**Abb. 38:** Bei der Probenahme einer Makrozoobenthos-Analyse löst sich eine Fahne von Feinsedimenten aus der Kiesbank: ein schlechtes Zeichen.

Feinsedimente setzen sich auch im Rheinischen Schiefergebirge auf vielen überströmten Kiesbänken ab und kolmatieren das Interstitial, wenn auch große Kahlschläge wie in Nordamerika nicht mehr vorkommen. Kieslaichende Fische wie Forelle und Lachs säubern zwar den Kies beim Ausheben ihrer Laichgruben, aber die Eier bleiben die gesamten Winter über im Sediment und müssen vom durch die Steine strömenden Wasser mit Sauerstoff versorgt werden. Insbesondere die moderne Landwirtschaft, bei der die Äcker überwiegend direkt nach der Ernte gepflügt werden und den Winter über (weitgehend) unbewachsen sind, liefert einen ständigen Nachschub an Feinsedimenten, so dass eine winterliche Kolmation von Kiesbänken in Einzugsgebieten mit hohem Ackeranteil sehr wahrscheinlich ist. DENIC & GEIST (2015) zeigten, dass die Deposition von Feinsedimenten in Kiesbänken in Bächen des Elbe-Einzugsgebietes mit der Abflussmenge korreliert war, jedoch nicht mit der Jahreszeit. Da jedoch in Westfalen die meisten Hochwasser im Spätwinter und Frühjahr auftreten, ist dann die Gefahr der Kolmation am größten, wie es auch ACORNLEY & SEAR (1999) in einem englischen Forellenbach feststellten.



Im Frühjahr auf Kies laichende Fische wie Äsche und Elritze können u.U. von Frühjahrshochwasser (wenn auf den Feldern weniger Offenboden vorhanden ist) profitieren, falls es zur richtigen Zeit kommt und die über den Winter angesammelten Feinsedimente wegspült. Für diejenigen Makrozoobenthos-Arten, die ständig im Interstitial leben, wäre das jedoch keine Hilfe.

Die Laichzeiten von Forelle und Lachs sind eine Anpassung an kalte Winter, in denen keine Hochwasser auftreten und die Eier in Kiesbänken dadurch vor Kolmation und Umlagerungen der Steine sicher sind – Bedingungen, wie sie in den Kaltzeiten in den meisten Fließgewässern herrschten, in Warmzeiten aber nur in den Oberläufen, und dort durch menschliche Eingriffe zunehmend seltener.



**Abb. 39:** Eine kopfstärke Population der Groppe bei gleichzeitig geringem Jungfischauftreten der Bachforelle kann ein Hinweis sein auf eine zwar gute Wasserqualität eines Baches, aber Beeinträchtigungen des Kieslückensystems. Als Art mit Brutpflege in ihren Unterständen ist die Groppe von Kiesbänken unabhängig.

### 3.4.3 Folgen des Kiesaustrags für Fische und Rundmäuler

Die Brutverstecker unter den rheophilen Fischarten benötigen Kiesbänke einer gewissen minimalen Mächtigkeit, um ihre Eier z.B. in Laichgruben abzulegen (s. Kapitel 3.4.1). Wird durch Begradigung, seitliche Einengung und Uferbefestigung zu viel Kies ausgetragen, kann die Mächtigkeit von Kiesbänken zu gering werden. Bereits vor diesem Zeitpunkt kann eine Kiesbank durch den Schwund zunächst der kleineren Kiesfraktionen und den Verbleib nur großer Steine ihre Eignung als Laichhabitat verlieren. Auch wenn großer Kies nur als Deckschicht oder „Sohlpanzerung“ auf Kiesschichten mit Steinen kleinerer Durchmesser liegt, können rheophile Fische die Deckschicht nur aufbrechen, wenn die Steine im Verhältnis zur Körperlänge der Tiere nicht zu groß sind.

Ein weiteres Problem des Substratschwundes für Fische und Rundmäuler ist die Verkleinerung des Grundwasserspeichers, was eine geringere Pufferung des Abflusses in Trockenzeiten sowie die Gefahr von Grundeisbildung in harten Wintern (s. 2.10) verursacht.

## 4 Hinweise und Anregungen für die Renaturierungspraxis

### 4.1 Allgemeines

Ziel der Renaturierung von Fließgewässern des Mittelgebirges sollte es sein, einen Zustand herzustellen, der die Ausprägung der potentiell natürlichen Habitats und Lebensraumfunktionen dauerhaft ermöglicht.



**Abb. 40:** Die Heve bei km 6,9

Maßnahmen zur Renaturierung sollen hydromorphologische Voraussetzungen für das Erreichen des wasserrechtlichen Bewirtschaftungsziels „guter ökologischer Zustand bzw. „gutes ökologisches Potential“ (§ 27 WHG) schaffen. Zahlreiche Gewässerabschnitte im Einzugsgebiet der Möhne sind zudem als Naturschutzgebiete und FFH-Gebiete ausgewiesen, verbunden mit dem Ziel, die lebensraumtypische Fauna und Flora zu erhalten und zu entwickeln. Diese naturschutzrechtlichen Ziele können Maßnahmen erfordern, die über das wasserrechtlich Erforderliche hinausgehen.

Maßnahmen zur Renaturierung können den natürlichen Zustand der Fließgewässer des Projektgebietes, wie er vor dem Mittelalter existierte, nicht wiederherstellen. Die anthropogene Ablagerung von Auelehm kann nicht rückgängig gemacht werden; zudem dauert diese auch heute noch an. Seit dem frühen Mittelalter hat der Mensch auch auf andere Weise Einfluss genommen: durch Ausleitung erheblicher Abflussanteile zur Mühlennutzung, durch Uferbefestigungen, durch Rodung der Talböden mit Folgen für die Ufervegetation und seine Effekte auf die Bettbildung, vermutlich auch durch Bekämpfung des Bibers.

Kies ist wegen seiner Bedeutung für die Habitatausprägung und damit die Biozönose ein besonders wichtiges Element dieser Bäche und Flüsse. Kies wird unter heutigen Klimabedingungen im Mittelgebirge nicht neu gebildet. Der auch heute die Sohle naturnaher Mittelgebirgsbäche prägende Kies ist eiszeitlich. Er wird überwiegend lokal bewegt. Kies ist damit eine beson-

ders wertvolle Ressource. Folge von Begradigungen sind erhöhte Transportkräfte bei Hochwasser, die die Kiese entmischen, das typische Pool-Riffel-System auflösen und zu Sohlerosion führen. Sohlerosion ist ein sich selbst verstärkender Prozess, der typischerweise erst bei Erreichen des Grundgebirges endet; er ist eine schwerwiegende, typische Schädigung vieler Bäche und Flüsse.

Uferbäume sind Quelle des Laubeintrags, eine bedeutende Nahrung im Ökosystem der Fließgewässer. In das Gewässer gestürzte Bäume sind wertvoll, weil das sie umströmende Wasser kleinräumig die Kiessohle neugestaltet und dabei kolmatierte Kiesbänke als Lebensraum und Laichplatz reaktiviert. Gestürzte Bäume sind zudem selber Lebensraum und bieten Fischen Schutz vor Prädation. Schatten zu spenden ist eine wichtige Funktion des Uferbewuchses, aber auch lichte Uferbereiche sind für das Ökosystem bedeutsam.

Insbesondere in der oberen Forellenregion hat die Dammbautätigkeit der Biber natürlicherweise erheblichen Einfluss auf die Gestalt der Gewässer. Es entstehen zum einen zusätzliche Habitats und damit eine höhere Artenvielfalt, zum anderen beeinflussen diese Habitats dort den Stoff- und Temperaturhaushalt sowie den Abfluss. Im Anschluss an die obere Forellenregion sind vom Biber gestürzte Bäume Auslöser eigendynamischer Prozesse: Sie bewirken kleinräumig Verlagerungen von Kiesen, die dabei „gewaschen“ werden; sie lösen lokal Seitenerosion aus, aktivieren damit Talkiese und weiten lokal das Gewässerprofil durch Aufzehrung von Auelehm.

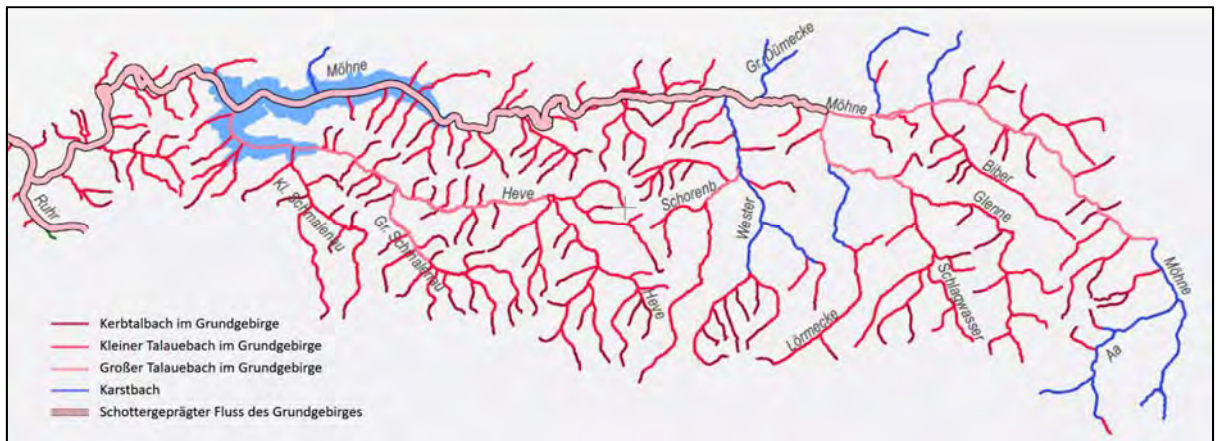
Es gibt zahlreiche Merkblätter und Richtlinien für die Renaturierung von Fließgewässern. Zweck nachfolgender Hinweise ist es nicht, Wiederholungen zu produzieren. Wir möchten vielmehr vor dem Hintergrund unserer Erfahrungen, insbesondere aber auch unserer eigenen Fragen und Unsicherheiten, die uns immer wieder bewegt haben, auf verschiedene Aspekte der Renaturierung von Fließgewässern des Mittelgebirges aufmerksam machen. Wo wir uns trauen, Hinweise zu geben, stellen wir diese hiermit auch zur Diskussion.

Wir tun dies sowohl als Planer und Träger von Renaturierungsprojekten als auch als Institution, die regelmäßig zu Planungen Stellung nimmt und in Planungen einbezogen ist.

#### **4.2 Umgang mit Leitbildern**

Das Leitbild beschreibt den heutigen potenziell natürlichen Zustand eines Gewässers. Es handelt sich um ein Konstrukt, das irreversible Faktoren miteinbezieht (MULNV 2003); zu letzteren zählt z.B. die Auelehmsituation. Zu Beginn jeder Planung ist das Leitbild zu beschreiben und ggf. entsprechend den lokalen naturräumlichen Verhältnissen anzupassen, siehe Blaue Richtlinie NRW (MULNV 2003).

Ausgangspunkt sind Typologie und Leitbildbeschreibungen der Gewässer.



**Abb. 41:** NRW-Gewässertypen im Einzugsgebiet der Möhne (LANUV 2002)

Unsere Erfahrungen mit Leitbildern sind zwiespältig: Einerseits ist der Grundgedanke des Leitbildes u.E. richtig, die Anwendung in der Planungspraxis offenbart jedoch Probleme:

- Grundproblem der gängigen Leitbilddarstellungen ist möglicherweise der Begriff des „Zustands“. Der Zustand eines Gewässers wird beeinflusst u.a. durch die Substrate von Sohle und Ufer, das Talgefälle und die hydrologischen Bedingungen – Randbedingungen also, die im Zuge einer Renaturierungsplanung nicht beeinflusst werden. Darüber hinaus ist der Gewässerzustand insbesondere kiesführender Gewässer aber maßgeblich beeinflusst durch die Kräfte, die bei Hochwassern – auch seltenen – auf das Gewässer einwirken. Sie werden maßgeblich bestimmt durch die Profilgeometrie und das Sohlgefälle, aus denen sich die Ausuferungshäufigkeit ergibt. Der in die Talaue ausgeuferte Anteil von Hochwassern übt auf das Gewässerbett keine Kräfte aus und umgekehrt. Profilgeometrie und Sohlgefälle (letzteres ergibt sich aus dem Windungsgrad) sind Randbedingungen, die durch die Renaturierungsplanung bestimmt werden. Nicht der Blick auf den Zustand eines naturnahen Gewässers oder eines Bildes davon ist entscheidend, sondern das Verständnis für die ihn bestimmenden treibenden Kräfte. Diese mit einer Renaturierungsplanung so einzustellen, dass sich die erwünschten Zustände eigendynamisch und dauerhaft einstellen, ist die – lösbare - Aufgabe.
- In zahlreichen Planungsunterlagen für Renaturierungsprojekte erschöpft sich die Leitbildbeschreibung mit dem Zitat entsprechender Angaben in Merkblättern und Handbüchern. Eine kritische Würdigung und eine Konkretisierung für den beplanten Projektabschnitt fehlt regelmäßig. Nicht selten mangelt es Planungen ganz an einer erkennbaren Leitbildorientierung.
- Die Angabe im Handbuch zur naturnahen Entwicklung von Fließgewässern (MULNV 2003) über das Leitbild-Merkmal „Laufkrümmung“ des kleinen Talauebachs im Grundgebirge („schwach gekrümmt bis geschlängelt, ...“) trifft auf keines der Gewässer dieses Typs im Projektgebiet zu. Folgt ein Planer unkritisch der Handbuch-Angabe, so wählt er eine Laufkrümmung, die bei gleichbleibender Profiltiefe zu hohe Transportkräfte bei Hochwassern ergibt und auf Dauer zu einer Entmischung des Sohlsubstrates und zu Sohlerosion führt. Im Projektgebiet erwiesen sich alle Windungsgrade von weniger als 1,5 („mäandrierend“) bei näherer Prüfung als anthropogen verändert; sie zeigten regelmäßig die typischen Merkmale der Entmischung des Sohlsubstrates und von Sohlerosion. Gleiches gilt im Projektgebiet für die Gewässer des Typs „Großer Talauebach im Grundgebirge“.

- Die Angabe im Handbuch zur kritischen Sohlschubspannung („30 bis 150 N/m<sup>2</sup>“) für den Kleinen Talauebach im Grundgebirge ist nicht hilfreich, weil sie undifferenziert viel zu weit gefasst ist. Das Beispiel in Abb. 21 legt nahe, dass jedenfalls bei den entsprechenden Gewässern im Projektgebiet Sohlschubspannungen über 40 bis 50 N/m<sup>2</sup> vermieden werden sollten. Systematische Untersuchungen natürlicher Gewässerabschnitte dieses Typs wären hilfreich.
- Im Projektgebiet finden sich Gewässerabschnitte mit anthropogenen Auelehmmächtigkeiten zwischen 20 cm bis über 200 cm Mächtigkeit. Was bedeutet die Auelehmmächtigkeit für die Konkretisierung des Leitbildes für den betrachteten Projektabschnitt? Die gängigen Merkblätter geben dem planenden Ingenieur leider keine Hinweise, wie er damit umgehen sollte (Näheres siehe Kap. 4.9).
- Im Projektgebiet finden sich an zahlreichen Gewässern Abschnitte ganz unterschiedlicher Einzugsgebietsgrößen, die als leitbildkonform gelten können und für Maßnahmen der Renaturierung nicht nur im Einzugsgebiet der Möhne als konkretisiertes Vorbild dienen können. Es fehlt unseres Erachtens an einer systematischen Aufarbeitung solcher Vorbilder für die Planungspraxis.
- Für die Entwässerung der Talauen zugunsten einer landwirtschaftlichen Nutzung wurden seit dem Mittelalter Bäche und Flüsse nicht nur an den Talrand verlegt und dabei begradigt, sondern auch die Talauen durch Entwässerungsgräben und den Ausbau kleiner Nebenbäche entwässert. Wir wünschen uns, die Talauen und die kleinen Nebenbäche stärker in die Leitbildbeschreibungen einzubeziehen.
- Insbesondere die obere Forellenregion ist potenziell „Biberdamm-Region“. Der Biber wird sich weiter ausbreiten. Wegen des erheblichen Einflusses des Bibers insbesondere auf die kleinen Talauebäche sollte sein Wirken in die Leitbildbeschreibung einbezogen werden.

### 4.3 Konkretisierung der Leitbilder für die Projektregion

Talgefälle, Größe des Einzugsgebietes und Auelehmmächtigkeit sind wesentliche morphologische Randbedingungen für die eigendynamische Ausprägung von Laufform, Windungsgrad und Profilgeometrie. Diese wiederum bestimmen die bei Hochwasser wirkenden Kräfte, unter deren Einfluss sich auch Form sowie Substrateigenschaften und -verteilung auf der Gewässer-sole ausbilden.

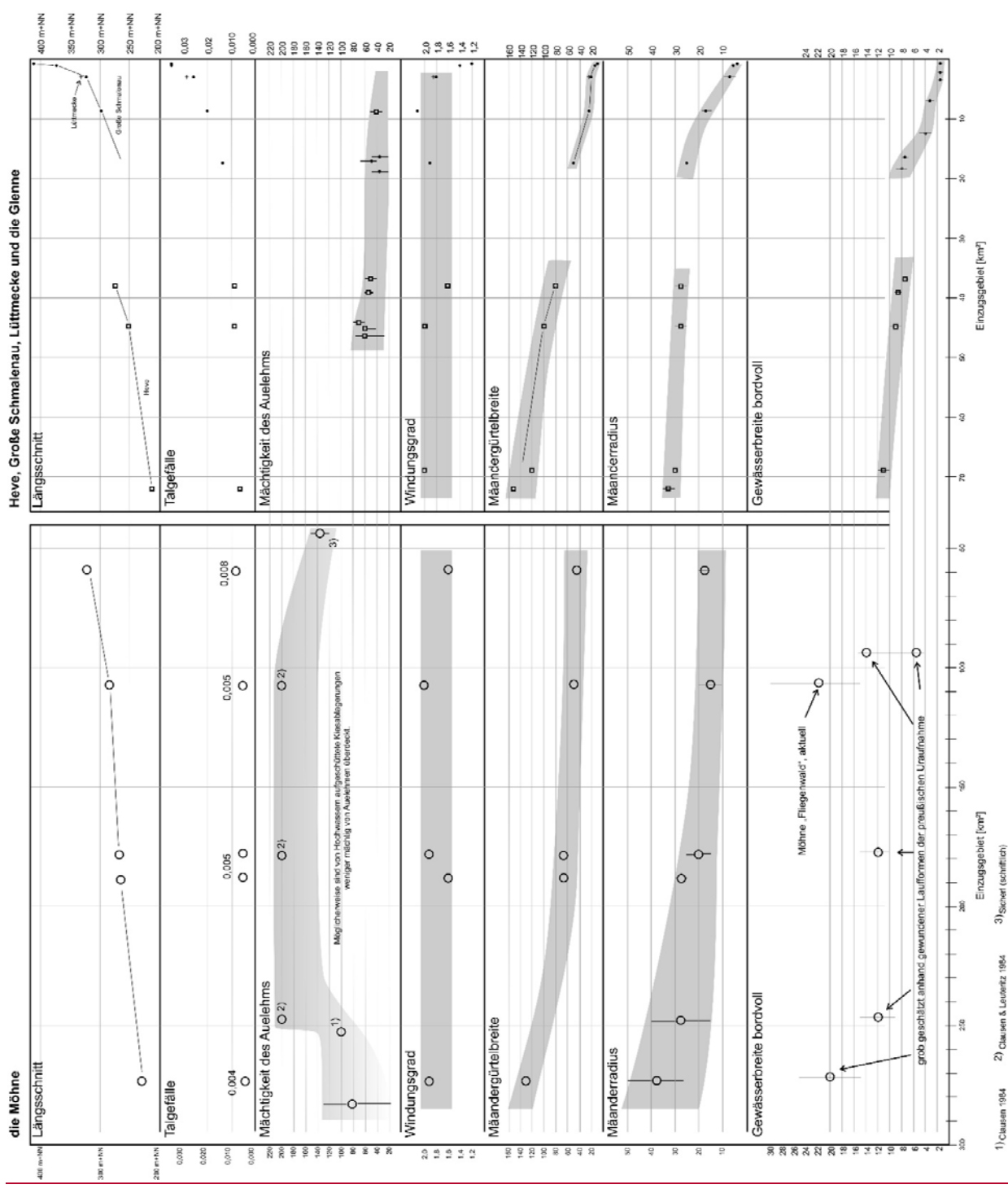
Im Einzugsgebiet der Möhne existieren noch heute Gewässerabschnitte, die offenkundig nie begradigt und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch nie befestigt wurden. Altlauf rudimente und historische Karten geben Informationen über weitere einst existierende, eigendynamisch entwickelte Laufformen und Laufgeometrien.

Sie geben wichtige Hinweise für die Konkretisierung des Leitbildes. Allerdings ist zu beachten, dass die Laufentwicklung seit dem frühen Mittelalter nicht nur durch die anthropogene Auelehmbildung, sondern zeitgleich durch weitere menschliche Einflussnahmen wesentlich mitgeprägt sein kann. Es ist also Vorsicht geboten.

Tabelle 4 enthält Kenndaten über heute vorhandene bzw. in der preußischen Uraufnahme dokumentierte Gewässerabschnitte (ausgenommen Kerbtalbüche), die für die Leitbildbeschreibung nützlich sein können. Abbildung 38 visualisiert diese Kenndaten.

**Tab. 4:** Kenndaten eigendynamisch entwickelter Gewässerabschnitte – existierend, als Laufrudiment tatsächlich vorhanden oder in der preußischen Uraufnahme dokumentiert

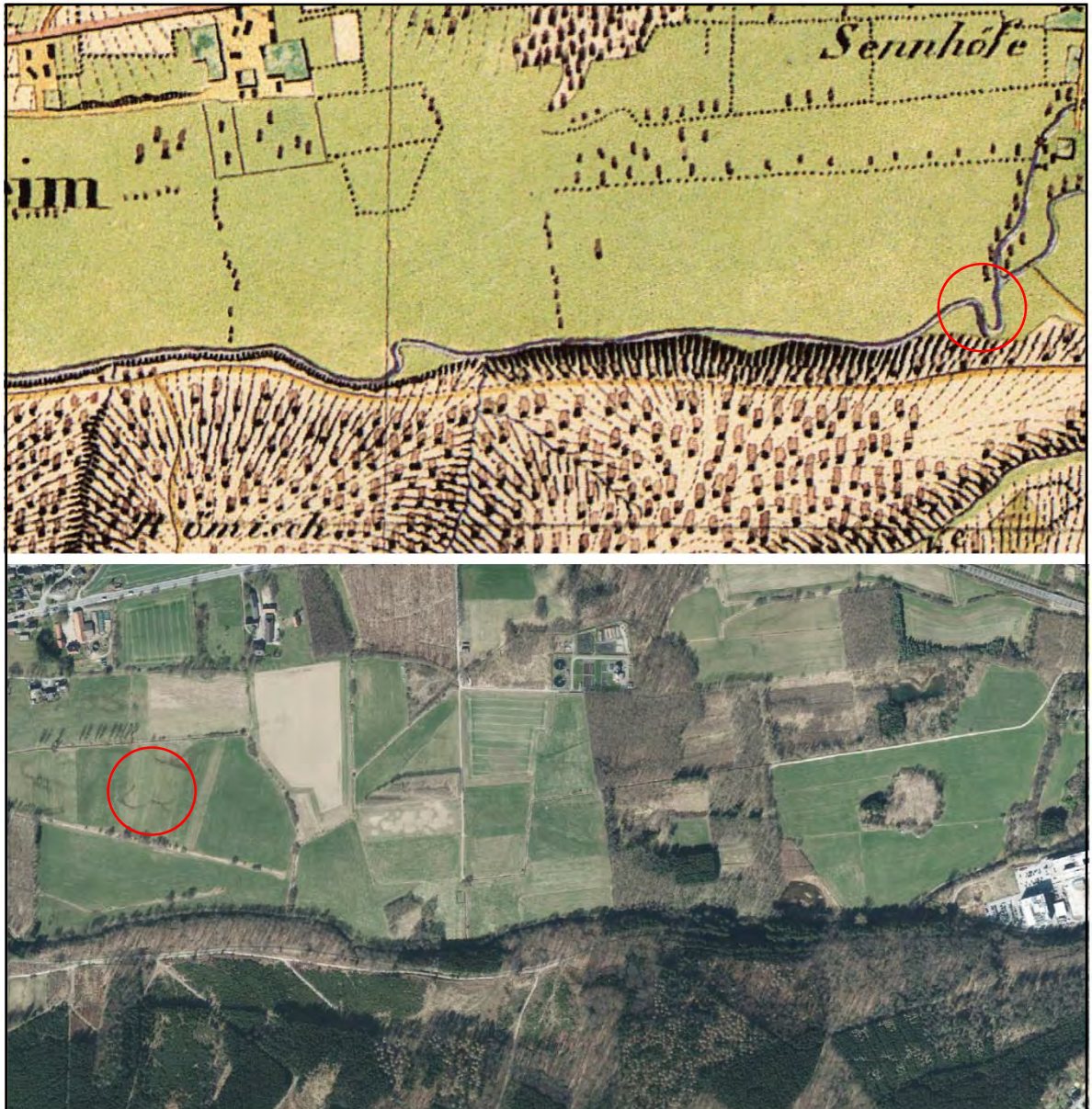
Name	km ELWAS von	km ELWAS bis	Delta-L [m]	Höhe Talboden unten	Höhe Talboden oben	Talabschnittslänge	Talgefälle	Windungsgrad	Mäandergürtelbreite	Mäander-radius	Mäander-radius	EZG [ha]	EZG [km <sup>2</sup> ]	Gewässerbreite [m]	Mächtigkeit Auelehm [cm]	Bemerkungen
Glenne	1,20	1,60	510			330		1,5	60	20	17				80	historischer Verlauf
Glenne	2,00															
Große Schmalenau	11,07	11,22	150	403,8	408,3	130	0,035	1,2	10	4	4	58	0,6			
Große Schmalenau	9,88	10,20	320	370,9	379,0	223	0,036	1,4	13	5	6	110	1,1	1,0 - 2,0		
Große Schmalenau	9,30													1,0 - 2,0		
Große Schmalenau	8,50													1,0 - 2,0		
Große Schmalenau	7,10													1,0 - 2,0		
Große Schmalenau	7,00	8,10	1100	315,8	331,5	595	0,026	1,8	20	4,5	8	279	2,8	2,5 - 4,0		
Große Schmalenau	6,50															
Große Schmalenau	5,50	5,85	500	295,1	299,9	240	0,020	2,1	22	15	18	875	8,8	3,0 - 5,0		historischer Verlauf
Große Schmalenau	4,60															
Große Schmalenau	3,00															
Große Schmalenau	1,70														20-50	
Große Schmalenau	1,50	2,90	1400	257,3	267,1	740	0,013	1,9	50	20	30	1730	17,1	40-60-(70)		
Große Schmalenau	0,85															
Große Schmalenau	0,30															
Heve	1,00	2,00	1000	213,8	220,0	990	0,006		150	30	35	7200	72,0	10,0 - 12,0		anhand historischer Laufrudimente
Heve	2,70	3,03	500	226,0	228,2	250	0,009	2,0	120	30	30	6900	69,0	(20)-40-60(80)		Altflure nach DGKS
Heve	5,0	5,0														
Heve	5,7															
Heve	6,3	6,3														
Heve	7,83															
Heve	6,2	8	1800	250,1	258	900	0,009	2,0	100	25	30	4480	44,8	8,0 - 10,0		
Heve	9,79															
Heve	10,3	11,6	1300	271,5	278,1	810	0,008	1,6	80	25	30	3810	38,1	8,0 - 9,0		ca. 50 cm Sohlerosion
Heve	11,68															
Halle	0,2															
Lüttmecke	0,67	1,40	730	326,1	338,2	416	0,029	1,8	20	6	6	231	2,3	40-60		
Möhne	28,40	29,20	800	228,1	229,7	420	0,004	1,9	130	25	50	27350	273,5	60-70-80		ca. 100 cm Sohlerosion
Möhne	33,00	35,00														
Möhne	35,3	35,9													100	
Möhne	38,2	38,9	1050	259,2	262,3	650	0,005	1,6	65	25	40	24800	248,0	200		
Möhne	39,9	40,93	1870	265,5	270,5	960	0,005	1,9	65	15	25	17900	179,0	200		aus Press. Uraufnahme
Möhne	43,3	43,65	735	281	282,75	365	0,005	2,0	50	10	20	10711	107,1	200		aus Press. Uraufnahme
Möhne	50,2	50,9	913	319	323,5	580	0,008	1,6	45	15	20	5950	59,5			
Möhne	56,5	58,3	1800							25	45	4400	44,0	120-150		



**Abb. 42:** Visualisierung von Kenndaten über heute vorhandene bzw. in der preußischen Uraufnahme dokumentierte Gewässerabschnitte (ausgenommen Kerbtalbüche)

Für Heve, Große Schmalenau, Lüttmecke und Glenne ergibt sich ein recht klares Bild, aus dem sich anhand des Parameters Einzugsgebietsgröße wesentliche Kennwerte des konkretisierten Leitbildes abgreifen lassen.

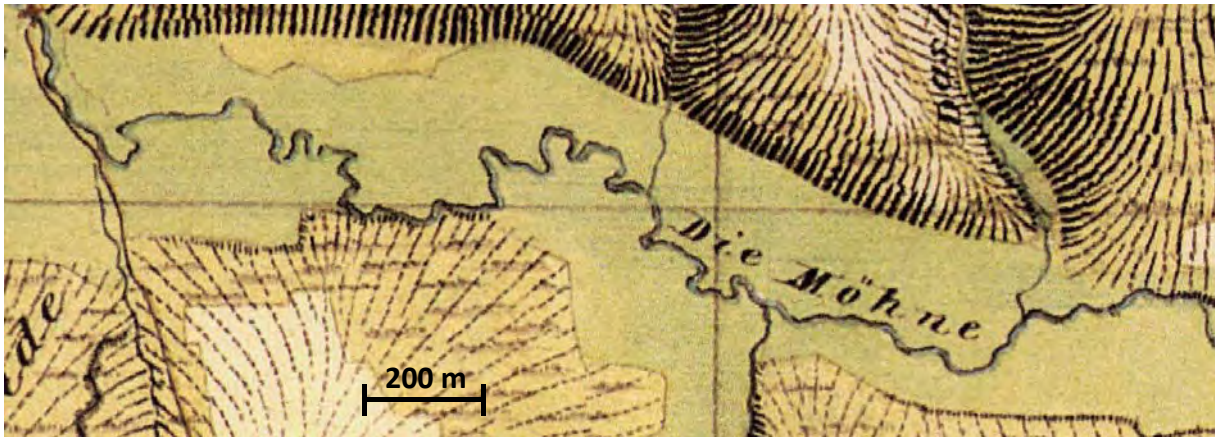
Die Daten für die Möhne zeigen ein deutlich inhomogeneres Bild. Es finden sich sehr kleine Mäanderradien von ca. 15 m (siehe Abb. 43), aber auch sehr viel größere von bis zu 40 m in unmittelbarer Nachbarschaft (siehe Abb. 44).



**Abb. 43:** oben: auffällig kleine Laufform (Mäanderradius ca. 15 m) der Möhne westlich von Gut Welschenbeck (EZG = 248 km<sup>2</sup>) in der preußischen Uraufnahme 1839-1850, unterhalb der Mündung der Wäster in Belecke (km 33,5 bis 35,5 gem. GSK3C)

unten: entsprechender Luftbildausschnitt (27.3.2017) mit ähnlich kleinen Laufformen, die sich noch heute im Grünland abbilden





**Abb. 44:** Die in der preußischen Uraufnahme dokumentierten Mäanderradien der Möhne zwischen km 39,5 und 41,5 (GSK3C) haben eine hohe Varianz.

Eine Ursache für die in Altlaufurkunden und in der preußischen Uraufnahme dokumentierten sehr kleinen Mäanderradien ist eventuell die ständige Ausleitung erheblicher Abflussanteile durch die Mühlennutzung. Sie wird für das Möhnetal erstmals für das 9. Jahrhundert erwähnt, also deutlich vor der Zeit, als sich der größte Teil des Auelehms abgelagerte. Die Bettbildung stand ab dem Mittelalter also vermutlich nicht nur unter dem Einfluss der anthropogenen Auelehmbildung, sondern wurde wahrscheinlich auch durch Ausleitung und Aufstau beeinflusst.



**Abb. 45:** Mühlennutzung in der Möhneue bei Rüthen (Preußische Uraufnahme 1839-1850)

Dokumente extrem kleiner Mäanderradien der Möhne haben wir nur oberhalb von Sichtigvor gefunden ( $EZG < 260 \text{ km}^2$ ). Möglicherweise werden kleine Mäanderradien auch dadurch begünstigt, dass in der von Auwald befreiten Aue die Ufer nicht nur aus kohäsiuem Auelehm bestehen, sondern auch von dicht stehenden Weiden und Schwarzerlen gesäumt waren, deren Wurzeln die Ufer stabilisierten, also vor Seitenerosion und Bettauflweitung schützten. Man darf davon ausgehen, dass sich die Bauern der damaligen Zeit dieser nützlichen Wirkung bewusst waren. Vergleicht man die Abstände der einreihigen Stämme von Schwarzerlen an den Ufern in Gründlandauen mit denen in Auwäldern, so sind die Unterschiede eklatant: In

geschlossenen Wäldern konkurrieren die einzelnen Bäume so sehr um das Licht, dass Stammabstände von 15 bis 20 Metern typisch sind; in Grünlandauen sind enge, einreihige Stammabstände möglich, weil jeder Baum genügend Licht von der Seite erhält; entsprechend bedeutsam ist ihre uferstabilisierende Wirkung.

Bei km 43,8 westlich von Belecke existiert ein Gewässerabschnitt der Möhne, der sich seit einigen Jahrzehnten ohne Gewässerunterhaltung und zugleich unter dem Einfluss großer Sturzbäume eigendynamisch entwickeln konnte („Möhne Fliegenwald“, siehe Abb. 46). Die Profilbreite hat sich von 15 bis 17 m im vorherigen Ausbauzustand auf bis zu 30 m nahezu verdoppelt. Der Auelehm wurde in diesem Umfang aufgezehrt. Unter den heutigen Strömungsbedingungen lagert sich in diesem Profil kein Auelehm ab. Die Sohle ist enorm vielfältig mit tiefen Kolken sowie Quer- und Längsbänken aus Kies (ABU 2020). Die Entwicklung dieses Abschnitts und der heutige Zustand gibt wertvolle Hinweise für die Konkretisierung des Leitbildes, auch wenn die Laufform - resultierend aus dem historischen Ausbau vor über 200 Jahren - gestreckt ist.



**Abb. 46:** Möhne bei km 43,8 („Fliegenwald“): Ein Abschnitt der Möhne, der sich seit einigen Jahrzehnten ohne Gewässerunterhaltung und unter dem Einfluss von großen Sturzbäumen eigendynamisch entwickeln konnte.



**Abb. 47:** Unter dem Einfluss großer Mengen an Totholz in diesem noch recht jungen Bestand an Schwarzerlen hat sich das vormals mäandrierende Einbettgerinne weitgehend in Chaos aufgelöst. Dies ist vermutlich ein Übergangsstadium, weil sich die Schwarzerlen weiter gegeneinander auskonkurrieren werden, dabei die Abstände der Einzelbäume stark zunehmen und bis zum Beginn der Zerfallsphase der alternden Bäume vergleichsweise totholzärmere und stabilere Verhältnisse herrschen werden.

Für das Projektgebiet können folgende **Leitbilder** formuliert werden:

**Leitbild „Kerbtalbäche“**

Für diesen Bachtyp verweisen wir auf die Leitbildbeschreibungen des Landes NRW (LANUV 2015).

**Leitbild „Kleine und große Talauebäche im Einzugsgebiet der Möhne“**

Die Bäche mäandrieren, der Windungsgrad liegt zwischen 1,5 und 2,0. Die Gewässer-  
sohle ist dominiert von eizeitlichen Kiesen mit einem weiten Korngrößenspektrum; die  
Fraktion  $\leq 20$  mm (Mittelkies und kleiner) nimmt mindestens ein Drittel der Kiese ein.  
Die Strömungskräfte führen zu einer ausgeprägten Pool-Riffel-Abfolge mit Furtabstän-  
den entsprechend ungefähr dem 4- bis 6-fachen der Sohlbreite. Die Furten liegen  
meistens höher als die Trennlinie zwischen Auelehm und Talkiesen, die Sohle der  
Kolke kann bis auf das Grundgebirge reichen. Die die Gewässersohle dominierenden  
Kiese werden bei Hochwassern i.W. lokal umgelagert, der großräumige Geschiebetrieb  
ist demgegenüber gering.

Typische Werte für Mäandergürtelbreiten, Mäanderradien und Gewässerbreite kön-  
nen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße der Abbildung Xx entnommen werden.

Mehrjährige Hochwasser ufern bedingt durch Profilgeometrien und Sohlgefälle aus,  
kleine Hochwasser ufern dort aus, wo Verkläunungen durch Totholz bestehen.

Je mächtiger die Auelehme sind, desto größer ist die Profiltiefe und desto kleiner das  
Breiten-Tiefen-Verhältnis. Auelehm und Gehölze begrenzen die Verlagerungsdynamik  
sehr deutlich. Je größer das Gewässer und je stärker „Störungen“ insbesondere durch  
großes Totholz sind, umso eher werden Auelehmufere angegriffen, finden sich lokale  
und teils erhebliche Profilaufweitungen verbunden mit einer hohen Varianz der Profil-  
breite. Dadurch können Inseln entstehen, die allmählich von Pestwurz (*Petasites hybri-  
dus*) und teils nachfolgend auch von Schwarzerlen besiedelt werden. Kleine Talauebä-  
che können aber auch bedingt durch Auelehm und Gehölze über viele Jahrzehnte na-  
hezu lagestabil sein.

Laufformen und Profilgeometrien insbesondere von Kleinen Talauebächen stehen  
auch unter dem Einfluss unterschiedlicher Stadien der Waldentwicklung in der Aue.  
Wo durch Kalamitäten oder wiederkehrende Prozesse der natürlichen Waldentwick-  
lung Bereiche mit Naturverjüngung entstanden sind, bewirken die nachfolgenden Kon-  
kurrenzprozesse des neu heranwachsenden Waldes über einige Jahrzehnte ein erhöh-  
tes Aufkommen von Totholz. Hierdurch bedingt können sich vormals bestehende Lauf-  
formen und Profilgeometrien befristet nahezu vollständig auflösen.

Insbesondere in den kleinen Talauebächen (obere Forellenregion) finden sich Biber-  
dämme, die teils seitlich umflossen oder auch durchflossen werden. In den Biber-  
teichen sedimentiert die bei Hochwassern transportierte Feinfraktion (Schluffe). Biber-  
teiche bestehen einige Jahre, werden aber auch immer wieder auch aufgegeben und  
wieder neu errichtet.

Die nasserer Bereiche der Talauen sind von Erlen dominiert, auf den trockeneren  
Standorten stocken Stieleichen. Bedeutende Auflichtungen finden sich dort, wo Biber-  
teiche existieren oder nachfolgend sog. Biberwiesen von Pflanzenfressern über Jahre  
gehölzfrei gehalten werden. Der Wasserhaushalt tiefer liegender Auenbereiche ist ins-  
besondere durch den Zufluss aus kleinen seitlichen Kerbtalbächen geprägt, deren Strö-  
mungskräfte mit Eintritt in die Talaue nicht ausreichen, um ein Gewässerbett auszubil-  
den. Folge ist das Entstehen kleiner Sümpfe. Das Wasser findet oft erst nach längerem  
Fließweg in der Aue seinen Weg in den Talauebach (Mündungsverschleppung).

### **Leitbild „Kiesgeprägter Fluss des Grundgebirges (Möhne)“**

Die Möhne mäandriert, der Windungsgrad liegt zwischen 1,5 und 2,0. Die Gewässersohle ist dominiert von eizeitlichen Kiesen mit einem weiten Korngrößenspektrum. Die Strömungskräfte führen zu einer ausgeprägten Pool-Riffel-Abfolge. Die Furten liegen meistens höher als die Trennlinie zwischen Auelehm und Talkiesen, die Sohle der Kolke kann bis auf das Grundgebirge reichen. Die die Gewässersohle dominierenden Kiese werden bei Hochwassern i.W. lokal umgelagert, der großräumige Geschiebetrieb ist demgegenüber gering.

Typische Werte für die Mäandergürtelbreite können der Abbildung Xx entnommen werden. Für Mäanderradien und Gewässerbreiten sind eher die oberen Werte der Abbildung Xx wahrscheinlich.

Hochwasser ufern bedingt durch Profilgeometrien und Sohlgefälle, aber auch bedingt durch vereinzelte mächtige Verklausungen durch Totholz früh aus.

Je mächtiger die Auelehme sind, desto größer ist die Profiltiefe und desto kleiner das Breiten-Tiefen-Verhältnis. Im Oberlauf begrenzen Auelehm und Gehölze deutlich die Verlagerungsdynamik, mit größer werdendem Einzugsgebiet reduziert sich ihr Einfluss. Die auelehmgeprägten Ufer werden überall dort angegriffen, wo es bei Hochwasser zu „Störungen“ durch großes Totholz kommt. Dort kommt es zu erheblichen Profilaufweitungen. Die Varianz der Profiltiefe ist im Gewässerverlauf hoch, ohne dass die grundlegende mäandrierende Laufform verloren geht.

Biberdämme fehlen im Fluss weitgehend, allenfalls saisonal errichteten Biber Dämme, die durch Hochwasser wieder untergehen. Biber haben gewissen Einfluss auf die Flusssmorphologie, weil sie die Menge insbesondere von großem Totholz erhöhen.

Ufergehölze – ab der Wästermündung zunehmend dominiert durch Weiden – beschatten das Gewässer teilweise. An vielen Abschnitten jedoch bestehen über viele Jahre Biberreviere, und dort sind viele der großen Weiden von ihnen gefällt. Ergebnis sind wenig beschattete Gewässerabschnitte. Werden Biberreviere aufgegeben, wachsen Weiden rasch wieder auf.

Die dauerhaft nasser Randbereiche der Talaue sind von Erlenbruchwäldern geprägt. Flussnah dominieren Weiden. Auf den trockeneren Standorten stocken Stieleichen. Große Bereiche der Aue sind sumpfig. Hier wird der Wasserhaushalt geprägt durch die seitlichen Einzugsgebiete, deren Abfluss in der breiten, wenig geneigten Talaue keine Ausbildung von Bachbetten erlaubt. Größere Nebenbäche, die auch in der Aue Bachbetten ausbilden, sind zudem vielfach durch Biber gestaut, so dass Teile der Aue von Wasserflächen bedeckt sind. Bedeutende Auflichtungen finden sich auch dort, wo auf Biberreiche Biberwiesen folgen, die von Pflanzenfressern über Jahre gehölzfrei gehalten werden.

#### 4.4 Der Planungsprozess

Planung mit mehreren Beteiligten ist oft anstrengend: Divergierende Meinungen, unterschiedlicher Kenntnisstand, Vorlieben, etc. können es mühselig machen, eine gemeinsame Vorstellung von den Maßnahmen zu entwickeln. Und sicherlich sind auch Naturschützer hin und wieder Ursache für komplizierte Entscheidungsprozesse. Und trotzdem: Die Komplexität der Aufgabe, häufig auch der erhebliche finanzielle Aufwand und das Ausmaß der Umgestaltung von Landschaft und öffentlichem Raum fordern eine gründliche Planung, genauso wie die – oft einmaligen – Chancen für Natur und Landschaft, die manche Projekte eröffnen und die genutzt sein sollten.

Besonders wichtig sind die frühen Planungsphasen. Hier werden Pflöcke eingeschlagen für die weitere Projektentwicklung.

Wie sind die hydrologischen, geologischen und naturkundlichen Gegebenheiten im Projekt- raum? Welche Informationen liegen vor? Welcher Umfang an Erkundungen des Projektgebietes sind am Anfang notwendig: Wie mächtig ist der Auelehm, wie verbreitet der eiszeitliche Talkies? Welche Dichte an Schürfen und anderen Erkundungsmethoden erscheinen notwendig?

Wie sieht das konkretisierte Leitbild aus? Was sind die nicht überwindbaren Restriktionen, welche Hürden können doch überwunden werden? Welche Ziele erscheinen angesichts des Korridors der Möglichkeiten erreichbar?

Welches Renaturierungskonzept soll das Projekt verfolgen: Reicht eine Aktivierung eigendynamischer Prozesse durch Hochwasser, indem Uferbefestigungen entfernt werden? Ist eine Neutrassierung notwendig? Sollen Altverläufe reaktiviert werden oder ist ihr Naturwert dafür zu hoch? Ist die Aue aktivierbar? Machen Ersatzauen Sinn oder erzeugen sie wegen zu großer Bodenmassen zu hohe Kosten, entkoppeln sie möglicherweise Fluss und Original-Aue zusätzlich? Wie geht man mit hohen Mächtigkeiten von Auelehm um? Wie sind die Transportbedingungen bei Hochwasser so einzustellen, dass Sohlerosion und Entmischung der Kiese vermieden werden?

Welche Vegetationsentwicklung ist gewünscht? Ist es Sukzession, die wir wünschen, oder bereitet uns das Risiko dominierender Neophytenbestände zu große Sorgen? Wollen wir Waldentwicklung auf den verfügbaren Flächen oder eine extensive landwirtschaftliche Nutzung? Ist vielleicht eine naturnahe, ganzjährige Beweidung genau das, was hier geeignet ist?

Welche Möglichkeiten einer naturnahen Auenentwicklung bietet der Projekttraum? Gibt es kleine Nebenbäche, die bisher unscheinbar und begradigt die Aue entwässern, statt ihren Wasserhaushalt zu prägen? Welche Entwässerungseinrichtungen können zurückgebaut werden, welche Entwässerungsfunktionen müssen erhalten werden?

Was kann das Projekt der Öffentlichkeit bieten - Wege, Informationen, Aussichtspunkte? Welche Konflikte gilt es zu bedenken? Welche Akzeptanzprobleme sind absehbar, wie können sie gelöst werden?

Um es deutlich zu sagen: Projekte, die baureif geplant plötzlich das Licht der Welt erblicken und dann Gegenstand formaler Beteiligungsverfahren sind, sind problematisch. Erfahrungsgemäß sind sie entweder nur noch gering veränderbar und enden oft in Enttäuschung und Konflikt.

Wir regen deshalb an zu prüfen, ob nicht zunächst die ersten beiden Planungsphasen – Grundlagenermittlung und Vorplanung – vergeben werden sollten einschließlich der Aufgabe, den

Planungsprozess im o.g. Sinne gut zu gestalten und zu moderieren. Nicht jedes Projekt mag dafür geeignet sein, nicht jedes Projekt dies erfordern. Die gemeinsame Freude der Beteiligten an einem gelungenen Projekt lohnt jedoch manche Mühe!

#### 4.5. Renaturierung durch Hochwasser

Die Strömungskräfte von Hochwassern wirken zu lassen kann ein sehr gutes und meistens auch kostenloses Mittel sein hin zu mehr Naturnähe.

Allerdings gilt es Einiges zu beachten:

Befestigte Profile können sich als weitgehend resistent gegenüber Strömungsangriffen erweisen. Dafür gab es im Projektgebiet nahe Neuhaus zwei eindrückliche Beispiele: der Unterlauf der Großen Schmalenau und die Heve oberhalb der Mündung der Großen Schmalenau. Begründet und befestigt vor rund 200 Jahren hatten sie allen Strömungskräften weitestgehend Stand gehalten. (Im Zuge des LIFE-Projektes „Bachtäler im Arnsberger Wald“ wurden diese Abschnitte durch Neutrassierung renaturiert.) Uferbefestigungen sollten also entfernt werden, um die Renaturierung durch Hochwasser anzustoßen.

Großes Totholz im Gewässer unterstützt die Renaturierung durch Hochwasser. Die eindrucksvolle Entwicklung des Möhneabschnitts „Fliegenwald“ unterhalb von Belecke (km 34,8 GSK3C) zeigt dies. Hier stürzen seit Jahrzehnten immer wieder große Uferbäume in den Fluss. Diese Entwicklungen brauchen Zeit. Und dieser Abschnitt zeigt keine Sohlerosion, vermutlich bedingt durch die seit Jahrhunderten sohlstützende Wirkung des Mühlenwehrs bei Sichtgvor (Wehr Eiling).



**Abb. 48:** Der seit Jahrzehnten andauernde Prozess der Renaturierung durch Hochwasser wurde hier an der Möhne „Fliegenwald“ (km 34,8) westlich Belecke durch große Sturzbäume unterstützt.

Setzt man dagegen bei begradigten und infolgedessen oft bis auf das Grundgebirge erodierten Gewässerbetten auf Renaturierung durch Hochwasser, so wird das Gewässerbett zwar struktureicher, die Sohlhöhe jedoch bleibt im Wesentlichen so, wie sie sich durch Sohlerosion eingestellt hat. D.h. jedes Hochwasser wird auch künftig unnatürlich hohe Transportkräfte mit sich bringen, Ausuferung in die Aue findet nicht statt. Das typische kiesgeprägte Pool-Riffel-System lässt sich so nicht reaktivieren.



**Abb. 49:** Der Unterlauf der Großen Schmalenau war vor der Renaturierung durch Erosion bis zu 1,8 m gegenüber der Aue eingetieft und floss vollständig auf dem Grundgebirge. „Renaturierung durch Hochwasser“ wäre hier kein geeignetes Konzept gewesen, um das typische kiesgeprägte Pool-Riffel-System zu reaktivieren.

Gewässer bilden in Sand oder Kies infolge der Strömungskräfte rasch die entsprechenden Laufformen und Profilgeometrien aus. Initialgerinne oder gar breite, ebene Sand- bzw. Kiesflächen können unter solchen Bedingungen eine sehr geeignete Ausgangssituation für die anschließende eigendynamische Entwicklung sein. In Auen mit Auelehm, wie im Einzugsgebiet der Möhne, sieht dies anders aus: Auelehm setzt den Strömungskräften erhebliche Haltekräfte entgegen. In schmalen Initialgerinnen, insbesondere wenn sie bis zum Talkies reichen, „reagiert“ das Gewässer mit Sohlerosion statt mit gewünschter Seitenerosion.



**Abb. 50:** Links ein Möhneabschnitt mit naturnaher Sohlbreite von mehreren Metern, rechts ein Initialgerinne im Auelehm in unmittelbarer Nachbarschaft des links abgebildeten Abschnitts: Es ist auch zwei Jahre später ein schmaler, eingeschnittener Bach in der Breite der Baggerschaufel.



Die mäandrierenden Laufformen mit den zugehörigen Profilabmessungen haben sich u.a. unter dem Einfluss zunehmender Auelehmmächtigkeiten ausgeprägt. Dabei wuchs über Jahrhunderte das Auenniveau, nicht jedoch das Niveau der kiesgeprägten Gewässersohle.

Leitet man ein Fließgewässer auf den Auelehm oder in ein schmales, von Auelehm begrenztes Initialgerinne, so löst man Entwicklungsprozesse aus, die grundsätzlich anders sind als die, unter denen die mäandrierenden Gewässer sich entwickelt haben. Dabei muss man allerdings einschränkend konstatieren, dass auch durch natürliche Störungen wie z.B. Verklausungen lokale Umlenkungen auf den Auelehm geschehen können, die zu neuen Verläufen führen. Das Jahrhunderthochwasser im Arnsberger Wald am 9. August 2007 gab dafür ein Beispiel: Im Hevensbrink unterhalb von Breitenbruch entstand eine Verklausung, die eine Bettbildung im Auelehm auslöste, die bis heute (2020) nicht abgeschlossen ist. Die systematische Kontrolle vieler Gewässerabschnitte nach diesem Hochwasser hat jedoch gezeigt, dass dies ein Einzelfall war. Fast alle naturnahen, mäandrierenden Gewässerabschnitte zeigten nach Ablauf dieses gewaltigen Hochwassers vielfach „unbeeindruckt“ annähernd ihre vorherige Gestalt.

#### 4.6 Erkundung der geologischen und bodenkundlichen Situation

Kenntnis über die geologische und bodenkundliche Situation ist für die Vorplanung essentiell.



**Abb. 51:** Schurf zur Erkundung des Bodenaufbaus und der Höhenlage des Talkieses in der Aue der Großen Schmalenau im Rahmen des LIFE-Projektes „Bachtäler im Arnsberger Wald“

Es gibt bis heute erstaunlicherweise kaum Erfahrungen mit dem Einsatz geophysikalischer Methoden zur Erkundung der Untergrundsituation in Talauen. U.a. wäre zu klären, ob Grundwasser in den Talkiesen methodische Probleme aufwirft (KASIELKE mdl.). Jedenfalls wären gute

Kenntnisse über die Untergrundsituation für die Konkretisierung des Leitbildes, aber auch für die Detailplanung sehr hilfreich.

Beispielhafte Anbieter entsprechender Dienstleistungen:

<http://www.gmbgmbh.de/geschaeftsbereiche/ingenieurleistungen/geophysik-geologie/>

<https://www.texplor.de/geophysikalischemessverfahren.html>

<http://www.ernstson.de/>

Allgemeine Informationen zur Geophysikalischen Methoden:

[http://www.arbeitshilfen-bogws.de/kapitel\\_7.6.2.html](http://www.arbeitshilfen-bogws.de/kapitel_7.6.2.html)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Bodenradar>

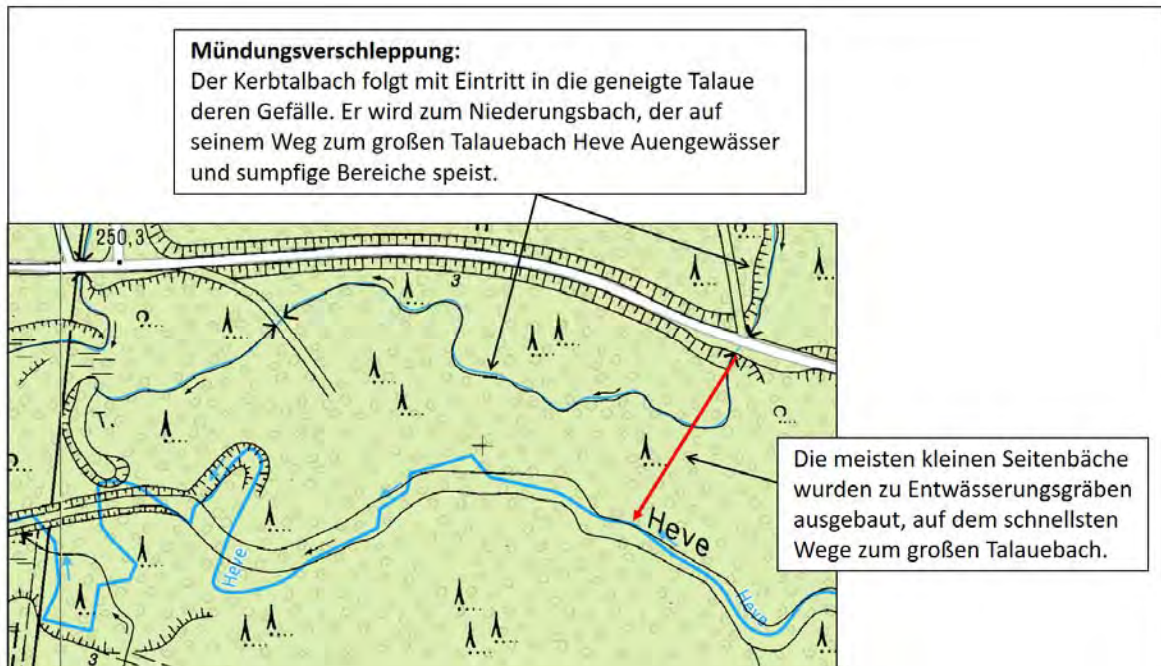
#### **4.7 Auen der Talauebäche und der Möhne**

Etwas zugespitzt: Aus Sicht der kiesgeprägten Talauebäche und der Möhne mit deren Fauna und Flora hat die Aue eine dominante Funktion: Sie nimmt den Abflussanteil von Hochwassern auf, der andernfalls die kiesgeprägte Gewässersohle und mit ihr das typische Pool-Riffel-System zerstört und dabei Sohlerosion und schädigende Drift auslöst.

Die Aue hat selbstverständlich für das Gewässer noch mehr Funktionen: Sie ist Lebensraum für die Flugstadien zahlreicher gewässerbewohnender Insekten, Gehölze tragen Laub ein in das Gewässer, die Talkiese speichern Wasser, stützen in Trockenperioden den Abfluss im Gewässer und reduzieren die Aufwärmung.

Überschwemmungen sind auch für die Aue von Bedeutung: Sedimente werden umgelagert und abhängig von lokal wirkenden Transportkräften nach Korndurchmessern sortiert wieder abgelagert; Samen werden eingetragen und finden wegen der standörtlichen Vielfalt lokal die artspezifischen Keimungsbedingungen; Ansammlungen von Geschwemmsel und Totholz können sich ausbilden, auentypische Strukturen, die z.B. bestimmten Insektenarten als Lebensraum dienen.

Für den Wasserhaushalt der Talauen haben seitliche Einzugsgebiete und deren kleine Nebenbäche eine herausragende Bedeutung: Sie setzen Mulden unter Wasser, schaffen Stillgewässer und sumpfige Bereiche. Diese Wirkungen werden oft übersehen, weil es an Vorbildern fehlt. Denn die Talauen wurden schon vor Jahrhunderten gezielt entwässert, um sie landwirtschaftlich nutzbar zu machen.



**Abb.52:** Mündungverschleppung ist ein natürlicherweise verbreitetes Phänomen in breiten Talauen. Meistens wurden diese Niederungsbäche als Entwässerungsgräben auf kürzestem Wege dem großen Bach zugeleitet.

Naturnahe Talauen selbst bieten eine großartige Fülle an Lebensräumen. Jede Maßnahme der Gewässerrenaturierung sollte sich schon in der Vorplanung damit auseinandersetzen und die jeweiligen Möglichkeiten für Erhalt und Entwicklung auentypischer Lebensräume nutzen.

#### 4.8 Ersatzauen

Ersatzauen sind künstlich tiefer gelegte Flächen an Fließgewässern, die Funktionen natürlicher Auen erfüllen sollen. Sie kommen in Betracht, wenn auf dem Niveau der morphologischen Aue das Wiederherstellen einer naturnahen Überflutungshäufigkeit, von grundwassernahen Standorten und auentypischen Gewässern wegen unveränderlicher Restriktionen, insbesondere von Grundstücken, die auch auf lange Sicht nicht erwerbbar sind, nicht möglich ist.

Sie kommen auch dort in Betracht, wo die anthropogen verursachten Auelehmlichkeiten so hoch sind, dass auch bei naturnaher Laufentwicklung die Einschnittstiefen bei Hochwassern hohe Transportkräfte bewirken, die zu Sohlerosion und Austrag der feineren Kiesfraktionen führen.

Ersatzauen sind immer nur ein unvollständiger Ersatz, ihre Herstellung ist meistens aufwändig, der Eingriff in das vorhandene Gelände erheblich. Bei der Planung von Ersatzauen sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen:

- a) Das Abbaggern, Transportieren und Ablagern bzw. anderweitige Verwenden von Böden erzeugt regelmäßig erhebliche Kosten. Es kann erhebliche Belästigungen für das betroffene Umfeld hervorrufen. Im Falle belasteter Böden wird knapper Deponieraum in Anspruch genommen.
- b) Der Eingriff in vorhandene Böden muss bodenschutzrechtlich bewertet werden.
- c) Im Einzelfall sind die betroffenen Flächen mit Funktionen bzw. Schutzfunktionen belegt, die mit den Funktionen der geplanten Ersatzau abzuwägen sind oder der Herstellung einer Ersatzau auch entgegenstehen können.

- d) Ist die Morphologie der heute vom Fluss weitgehend abgekoppelten Auenflächen noch ursprünglich und damit Zeuge früherer natürlicher Prozesse und Situationen (Beispiel: Lippe zwischen Dorsten und Wesel), so ist abzuwägen, ob die mit einer Ersatzauë beabsichtigten Funktionen die Beseitigung solcher Strukturen rechtfertigen.
- e) Bei höheren Abflüssen kommt es an den Ufern und auf den überschwemmten Flächen zu Sedimentationsprozessen, die die Frage aufwerfen, wie dauerhaft hergestellte Ersatzauen und ihre Funktionen sein werden.

Ersatzauen können im konkreten Fall die einzige Möglichkeit sein, räumlich begrenzt das natürliche, frühzeitige Ausuferndes Gewässers zu ermöglichen und dadurch unnatürlichen Transportkräften bei Hochwassern vorzubeugen. Sie ermöglichen so die Ausdifferenzierung naturnaher Sedimentstrukturen. Darüber hinaus stellen sie auentypische Standorte zur Verfügung.

Zu Beginn der Maßnahmenplanung sind folgende Fragen relevant:

- Ist die Reaktivierung der morphologischen Aue heute oder auch künftig offenkundig unmöglich? Könnten nicht veränderbare Nutzungen und erforderliche Einrichtungen der Infrastruktur durch Maßnahmen aufrechterhalten werden, wenn die morphologische Aue reaktiviert würde? Ist es denkbar, einen Teil der morphologischen Aue zu reaktivieren, indem Schutzmaßnahmen für nicht reaktivierbare Flächen ergriffen werden? Können die Flächen, die durch eine Reaktivierung in Anspruch genommen würden, mittel- oder langfristig durch Erwerb oder anderweitig verfügbar gemacht werden?
- Welche Funktionen soll die Ersatzauë erfüllen, welche Habitats soll sie bieten? Welche der angestrebten Funktionen haben Vorrang?
- Lassen sich bestimmte Funktionen bzw. Habitats auch auf andere Weise als durch Ersatzauen wiederherstellen?
- Wie groß muss die Ersatzauë sein und wie sollte sie gestaltet sein, damit sie die angestrebten Auenfunktionen dauerhaft erfüllen kann?

Der Prozess der Auelehmbildung ist nicht abgeschlossen. D.h. Ersatzauen landen allmählich wieder auf. Dies ist u.E. aber kein Argument, das Ersatzauen von vornherein nicht zweckmäßig erscheinen lässt. Dafür sind die Auflandungsprozesse zu langwierig.

#### **4.9 Umgang mit Auelehm bei Neutrassierung**

Auelehm ist ärgerlich! Er reduziert die Bettodynamik, die Profilbreiten, die Ausuferungshäufigkeit. (Einzig der Eisvogel freut sich über zusätzliche Brutmöglichkeiten).

Ist der Auelehm nur wenige Dezimeter mächtig, ist der Umgang damit bei einer Neutrassierung kein Problem.



**Abb. 53:** Im Unterlauf der Großen Schmalenau ist der Auelehm nur wenige Dezimeter mächtig. Für die Neutrassierung kein Problem: Er wurde im Januar 2013 auf der neuen Trasse bis auf den Tal-kies abgekratzt und zum Verstopfen des vormaligen, begradigten und erodierten Laufes verwendet.

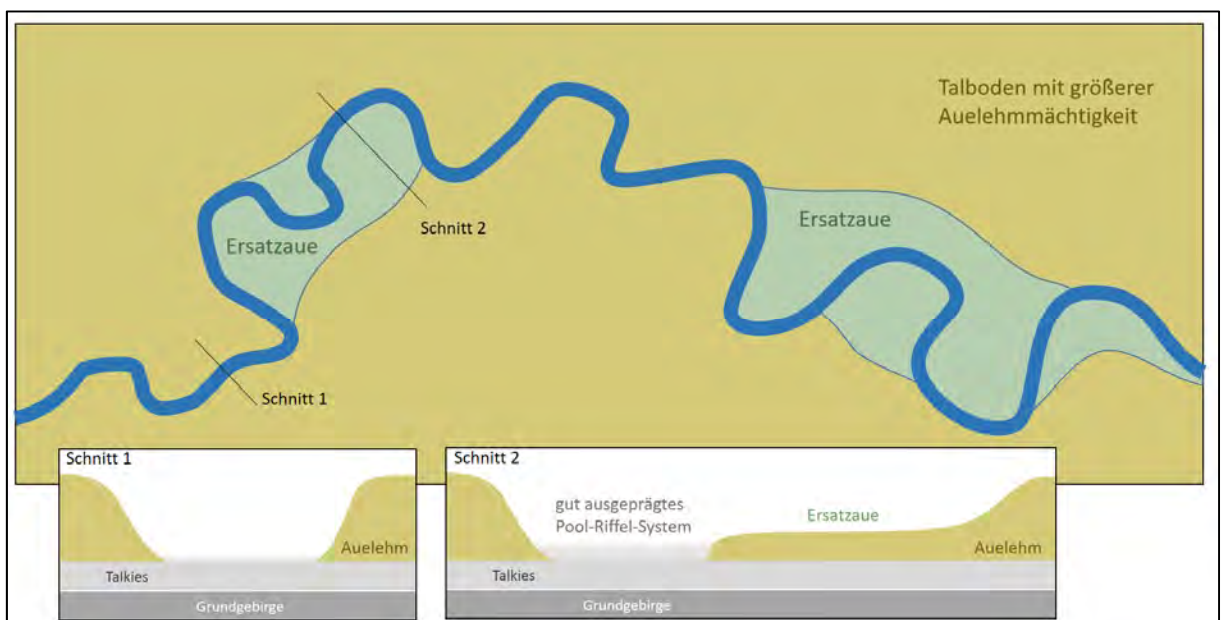


**Abb. 54:** Derselbe Gewässerabschnitt im September 2013: Das Pool-Riffel-System entsteht rasch eigen-dynamisch.

Ist der Auelehm über einen Meter und mehr mächtig, stellen sich Fragen:

- Sind flache Profile im Auelehm mit früher Hochwasserentlastung ein sinnvolles Konzept? Woher kommt dann der Kies und wie soll sich im flachen Lehmprofil das Pool-Riffel-System ausbilden? Was bedeutet die Entkopplung von Talkies und Gewässersohle? Kann in Trockenzeiten der Abfluss komplett durch den tiefliegenden Talkies laufen und die höher liegende neue Sohle trockenfallen lassen?
- Weg mit dem Auelehm in einem Korridor größer als die Mäandergürtelbreite gemäß Leitbild – das könnte ein Konzept sein! Doch wohin mit dem Auelehm? Sind die Kosten finanzierbar, vertretbar, angemessen? Wie bewertet man die Abkopplung der übrigen Aue aus dem Überflutungsregime?
- Beseitigung des Auelehms auf der neuen Trasse in einer Breite gemäß Leitbild und bis zum Talkies. Das hat Vorteile: überschaubare Auelehmmassen, kiesgeprägte Sohle. Doch wird sich in dem kompakten, recht tiefen Profil das Pool-Riffel-System ausbilden können? Sind die Transportkräfte bei Hochwasser so groß, dass der Kies, vor allem die kleineren Fraktionen, ausgetragen werden oder gar Sohlerosion die Folge ist?

Wir schlagen bei großen Auelehmmächtigkeiten ein Konzept vor, das Ersatzauen als Trittsteine vorsieht und die Anbindung der kiesgeprägten Sohle an den Talkies erhält. Auf den Abschnitten zwischen den einzelnen Ersatzauen nehmen wir hin, dass sich ein Pool-Riffel-System wegen erhöhter Transportkräfte bei Hochwasser möglicherweise nicht ausbildet. Auf den Ersatzauenabschnitten dagegen herrschen Strömungsbedingungen, die eine Pool-Riffel-Abfolge und eine breite Abstufung der Körnungen des Sohlkieses ermöglichen. Die Kosten für die Ersatzauen sind begrenzt; handelt es sich um eine Neutrassierung, bietet der vorherige begradigte und erodierte Lauf möglicherweise Raum für die Unterbringung von Bodenmassen. Die Ausuferungshäufigkeit in die Original-Aue bleibt annähernd erhalten.



**Abb. 55:** Vorschlag eines Ersatzauensystems, das dem Trittsteinkonzept folgt.

Umfang und Ausmaß der Ersatzauen müssen sich nach den örtlichen Gegebenheiten und dem Finanzrahmen richten.



**Abb. 56:** Neuer Möhneverlauf mit Ersatzaue bei Allagen wenige Monate nach dem Ende der Baumaßnahme.

#### 4.10 Kieszugabe

Der Kies ist eine wertvolle Ressource. Mangelt es an Kies, fehlen Mittel- und Feinkiese weitgehend, so kann nicht erwartet werden, dass sich die gewässertypische Fauna annähernd vollständig ausbildet.

Die Bedingungen für das einzelne Projekt können einen erheblichen Mangel an Kies mit sich bringen. Ist Kieszugabe eine Option?

Infrage kommt nur autochthoner Kies. Bei kleinen Bächen mag Kieszugabe technisch und finanziell noch denkbar sein. Voraussetzung ist aber, dass eiszeitliche Kiesvorkommen vorhanden und gewinnbar sind. Je größer das Gewässer, desto aussichtsloser dürfte dieser Gedanke sein.

#### 4.11 Mechanische „Kiesreinigung“

Durch fehlende Gewässerdynamik, hohe Schwebstoff- und Feinsedimentfrachten und Stauhaltung können Kiesbänke, die grundsätzlich für lithophile Arten geeignet sind, kolmatieren. Auflockerung oder mechanische Reinigung durch Umschaukeln mit Baggern, „Waschtrommeln“, in denen Kies in der Strömung bewegt wird u.ä. Maßnahmen wurden bisher v.a. im Rhithral eingesetzt, um Laichplätze für Lachse und andere Salmoniden zu optimieren (z.B. PULG 2007, PULG & SCHNELL 2011, BAŠIĆ et al. 2017). Auch in Zuflüssen zum Rhein in Nordrhein-Westfalen wurden solche Aktionen durchgeführt. Versuche zeigten jedoch, dass die Wirkungsdauer der Maßnahmen sehr kurz – meist nur wenige Wochen – ist (PANDER et al. 2015, BAŠIĆ et al. 2017) und die Kiesreinigung mit dem Bagger zudem Gewässerstrecken flussabwärts durch den Eintrag von Feinsedimenten beeinträchtigt (PANDER et al. 2015).

Von einer mechanischen Kiesreinigung ist somit abzuraten.

#### 4.12 Totholz

Totholz (woody debris) ist ein typisches Requisite naturnaher Bäche und Flüsse. Unter natürlichen Bedingungen werden Totholz mengen erreicht, die uns kaum vorstellbar erscheinen (z.B. HERING et al. 2000, MONTGOMERY et al. 2002). Totholz strukturiert den Lebensraum Fließgewässer. Es kann Verklausungen (log jams) erzeugen, die zu Ausuferungen führen. Totholz ist Impulsgeber für Seitenerosion und lokales Aufmischen der Sohlkiese und kann ein unnatürliches Eintiefen der Sohle bremsen. Totholz ist selbst Lebensraum.



**Abb. 57:** Totholz in der Kleinen Schmalenau.

Einmalig eingebrachtes Totholz hat allerdings nur zeitlich begrenzte Wirkung. Entscheidend für den langfristigen Eintrag von Totholz sind ufernahe Gehölze, die altern und stürzen dürfen (z.B. LINSTEAD & GURNELL 1999, GURNELL et al. 2002).

Aus den von LINSTEAD & GURNELL (1999) entwickelten Leitlinien für ein Totholz-Management für britische Fließgewässer bis ca. 10 m Breite sind folgende Punkte direkt auf das Möhnesystem übertragbar:

- Totholz aus Gewässern sollte nur entfernt werden, wenn es z.B. aus Gründen des Hochwasserschutzes unvermeidlich ist.
- Die Entnahme von Ufergehölzen oder ihr Auf-den-Stock-setzen sollte unterbleiben.
- Wenn Ufergehölze fehlen oder noch sehr jung sind, kann Totholz künstlich eingebracht werden. Solche Stämme sollten in ihrer Länge mindestens die Gewässerbreite erreichen und/oder einen Durchmesser des 0,1- bis 0,05-fachen der Gewässerbreite.
- Totholz im Gewässer sollte möglichst nicht fixiert werden.



## 5 Literatur

ABU (Hrsg.) (2014): Bachtäler im Arnsberger Wald – LIFE-Projekt 2009 – 2014. – Laienbericht zum LIFE-Projekt. Arbeitsgemeinschaft Biologischer Umweltschutz im Kreis Soest e.V., Bad Sassendorf. 58 S. <http://www.life-bachtaeler.de/downloads/send/3-downloads/122-life-bachtaeler-broschuere.html>

ABU (2020): Abschlussbericht “Kiesstrukturen und Fischfauna renaturierter Talauebäche und Flüsse des Mittelgebirges im Einzugsgebiet der Möhne”. – Studie im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Dezernat für Wasserwirtschaft und Gewässerschutz. - Arbeitsgemeinschaft Biologischer Umweltschutz im Kreis Soest e.V., Bad Sassendorf, mit Beiträgen der Universität Duisburg-Essen.

ALFREDSEN, K. & M. STICKLER (2013): Dynamic ice formation processes in two Norwegian rivers – implications for the environment and hydropower. - CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, 17th Workshop on River Ice. Edmonton, Alberta, July 21 - 24, 2013.

BALON, E. K. (1975): Reproductive guilds of fishes: a proposal and definition. - Journal of the Fisheries Research Board of Canada 32: 821–864.

BAŠIĆ, T., J.R. BRITTON, S.P. RICE & A.G. PLEDGER (2017): Impacts of gravel jetting on the composition of fish spawning substrates: Implications for river restoration and fisheries management. - Ecological Engineering 107: 71-81.

BASKIN, L. M., N.S. NOVOSELOVA & L. BARYSHEVA (2011): Landscape level habitat selection by beavers and the long-lasting effects of beaver settlements. - In: SJÖBERG, G. & J.P. BALL (2011): Restoring the European beaver: 50 years of experience. - Pensoft Publishers, Sofia: 195-204.

BECHSTEIN, J.M. (1801): Gemeinnützige Naturgeschichte Deutschlands nach allen drey Reichen – Ein Handbuch zur deutlicheren und vollständigeren Selbstbelehrung für Forstmänner, Jugendlehrer und Ökonomen. Erster Band, welcher die nöthigen Vorkenntnisse und die Geschichte der Säugethiere enthält. - Crusins, Leipzig. 1370 S.

BELTAOS, S., R. POMERLEAU & R.A. HALLIDAY (2000): Ice-jam effects on Red River flooding and possible mitigation methods. Report prepared for the International Red River Basin Task Force, International Joint Commission. 21 pp.

BINDER, W. & H. PATT (2016): Besiedlungsdynamik. – In: PATT, H. (Hrsg.): Fließgewässer- und Auenentwicklung – Grundlagen und Erfahrungen: 18-25. 2. Auflage. Springer, Vieweg.

BLESS, R. (1992): Einsichten in die Ökologie der Elritze *Phoxinus phoxinus* (L.). – Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 35, 68 S.

BLESS, R. (1996): Reproduction and habitat preference of the threatened spirlin (*Alburnoides bipunctatus*) and soufie (*Leuciscus souffia*) under laboratory condition. - In: KIRCHHOFER, A. & D. HEFTI (Hrsg.): Conservation of Endangered Freshwater Fish in Europe, 249-258. - Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.

BRADFORD, M.J. & J.S. HEINONEN (2008): Low flows, instream flow needs and fish ecology in small streams. - Canadian Water Resources Journal 33: 165-180.

BRANß, T. & A. DITTRICH (2016): Erzeugung von Rehnen: Eine experimentelle Studie. - Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 57. 39. Dresdner Wasserbaukolloquium 2016 „Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement“: 275-284.

- BRANß, T., A. DITTRICH & F. NÚÑEZ-GONZÁLEZ (2016): Reproducing natural levee formation in an experimental flume. - River Flow 2016 (Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics): 1122-1128.
- BREITENSTEIN, M. & A. KIRCHHOFER (1999): Biologie, Gefährdung und Schutz des Schneiders (*Alburnoides bipunctatus*) in der Schweiz. - Mitteilungen zur Fischerei Nr. 62, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 46 S.
- BREW, A.K., J.A. MORGAN & P.A. NELSON (2015): Bankfull width controls on riffle-pool morphology under conditions of increased sediment supply: Field observations during the Elwha River dam removal project. - Paper presented at the 3rd Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, Reno, Nev.
- BROWN, A.G., M.K. KEOUGH & R.J. RICE (1994): Floodplain Evolution in the East Midlands, United Kingdom: The Lateglacial and Flandrian Alluvial Record from the Soar and Nene Valleys. - Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering Vol. 348, No. 1687: 261-293.
- BROWN, R.S. (1999): Fall and early winter movements of Cutthroat Trout, *Oncorhynchus clarki*, in relation to water temperature and ice conditions in Dutch Creek, Alberta. - Environmental Biology of Fishes 55: 359-368.
- BROWN, R.S., W.A. HUBERT & S.F. DALY (2011): A primer on winter, ice, and fish: what fisheries biologists should know about winter ice processes and stream-dwelling fish. - Fisheries 36 (1): 8-26.
- BUNZEL-DRÜKE, M. & O. ZIMBALL (2016): Vertiefendes Monitoring Bördebäche: Zur Fischfauna der Bördebäche. - Gutachten im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg. Arbeitsgemeinschaft Biologischer Umweltschutz im Kreis Soest e.V., Bad Sassendorf-Lohne. 91 S.
- BUNZEL-DRÜKE, M. & O. ZIMBALL (2004): Ein holozäner Biberdamm im Wästertal. - Mskr.
- CASPERS, G. (1993): Fluviale Geomorphodynamik und Vegetationsentwicklung im Tal der Weser seit dem Spätglazial. - Ber. Naturhist. Ges. Hannover 135: 29-48.
- CLAUSEN, C.-D. (1984), mit Beitr. von F.-D. ERKWOH, H. GRÜNHAGE, H. V. KAMP, H.-W. REHAGEN & M. WOLF: Erläuterungen zu Blatt 4515 Hirschberg. Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25 000. - Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld. 115 S.
- CLAUSEN, C.-D. & K. LEUTERITZ (1984), mit Beitr. von F.-D. ERKWOH, H. V. KAMP, H.-W. REHAGEN, P. WEBER & M. WOLF: Erläuterungen zu Blatt 4516 Warstein. Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25 000. - Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld. 155 S.
- CUNJAK, R.A. (1996): Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. 53 (Suppl. 1): 267-282.
- DALBECK, L. (2011): Biber und Wasserrahmenrichtlinie – Hinweise zum Umgang mit einer sich ausbreitenden Schlüsselart für die WRRL. - Biologische Station im Kreis Düren e.V. 4 S.
- DALBECK, L., B. LÜSCHER & D. OHLHOFF (2007): Beaver ponds as habitat of amphibian communities in a central European highland. - Amphibia-Reptilia 28 (2007): 493-501.
- DANILOV, P., V. KANSHEV & F. FYODOROV (2011): Characteristics of North American and Eurasian beaver ecology in Karelia. - In: SJÖBERG, G. & J.P. BALL (2011): Restoring the European beaver: 50 years of experience. Pensoft Publishers, Sofia: 55-72.
- DENIC, M. & J. GEIST (2015): Linking stream sediment deposition and aquatic habitat quality in pearl mussel streams: implications for conservation. - River Research and Applications 31: 943-952.

DRÜKE, J., B. BECKERS & R. LOERBROKS (2016): LIFE-Projekt Bachtäler im Arnsberger Wald. - In: PATT, H. (Hrsg.): Fließgewässer- und Auenentwicklung – Grundlagen und Erfahrungen: 538-563. 2. Auflage. Springer, Vieweg.

ERKENS, G. (2009): Sediment dynamics in the Rhine catchment: quantification of fluvial response to climate change and human impact. - Neth. Geogr. Stud. 288: 1-278.

FABRICIUS, E. & K.J. GUSTAFSON (1955): Observations on the spawning behaviour of the grayling, *Thymallus thymallus* (L.). - Reports of the Drottningholm Freshwater Research Institute 36: 75-103.

FELDMANN, R. (1984): Biber – *Castor fiber* Linnaeus, 1758. - In: SCHRÖPFER, R., R. FELDMANN & H. VIERHAUS (Hrsg.): Die Säugetiere Westfalens. - Abhandlungen aus dem Westfälischen Museum für Naturkunde, Münster. 393 S.

GESNER, C. (1581): Historia animalium; liber 1. – Froschauerverlag, Zürich. 1188 S. (in der deutschen Übersetzung – ins Deutsche übertragen von FOERER).

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.

GURNELL, A.M. (1998): The hydrogeomorphological effects of beaver dam-building activity. - Progress in Physical Geography 22: 167-189.

GURNELL, A.M., H. PIÉGAY, F.J. SWANSON & S.V. GREGORY (2002): Large wood and fluvial processes. - Freshwater Biology 47: 601–619.

HARNISCHMACHER, S. (2002): Fluvialmorphologische Untersuchungen an kleinen, naturnahen Fließgewässern. - Bochumer Geographische Arbeiten 70: 1-304.

HARTHUN, M. (1998): Biber als Landschaftsgestalter – Einfluß des Bibers (*Castor fiber albicus* Matschie, 1907) auf die Lebensgemeinschaft von Mittelgebirgsbächen. – Schriftenreihe der Horst-Rohde-Stiftung, Maecenta, München. 199 S.

HEIDECHE, D. & B. KLENNER-FRINGS (1992): Studie über die Habitatnutzung des Bibers in der Kulturlandschaft. - In: SCHRÖPFER, R., M. STUBBE & D. HEIDECHE: Materialien des 2. Internationalen Symposiums „Semiaquatische Säugetiere“ in Osnabrück vom 9.6. bis 12.6.1992. – Wissenschaftliche Beiträge der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg: 215-265.

HELM, G. (2003): Bracks – stille Zeugen dramatischer Ereignisse. - Lichtwark-Heft Nr. 68. Verlag HB-Werbung, Hamburg-Bergedorf.

HERING, D., J. KAIL, S. ECKERT, M. GERHARD, E.I. MEYER, M. MUTZ, M. REICH & I. WEISS (2000): Coarse woody debris quantity and distribution in Central European streams. - Internat. Rev. Hydrobiol. 85: 5-23.

HICKS, B. J. (2002): Gravel galore: impacts of clear-cut logging on salmon and their habitats. – In: Harvey, B. & M. MacDuffey (eds.): Ghost runs: the future of wild salmon on north and central coasts of British Columbia: 97-118. - Victoria, British Columbia: Raincoast Conservation Society.

JAKES, A.F., J.W. SNODGRASS & J. BURGER (2007): *Castor canadensis* (beaver) impoundment associated with geomorphology of southeastern streams. – Southeastern Naturalist 6: 271–282.

JOHN, S. & A. KLEIN (2004): Hydrogeomorphic effects of beaver dams on floodplain morphology: avulsion processes and sediment fluxes in upland valley floors (Spessart, Germany). - Quaternaire 15: 219-231.

- JUNGWIRTH, M., G. HAIDVOGL, O. MOOG, S. MUHAR & S. SCHMUTZ (2003): Angewandte Fischökologie an Fließgewässern. - Facultas, Wien. 547 S.
- KASIELKE, T. (2017): Holozäne Fluss- und Auenentwicklung der Ruhr - Ergebnisse der geomorphologische Untersuchungen im Fächter Ruhrbogen. - Projektbericht im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg. Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut. 62 S.
- KALIS, A.J., J. MERKT & J. WUNDERLICH (2003): Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe - human impact and natural causes. - Quaternary Science Reviews 22: 33–79.
- KEELEY, E. R. & P. A. SLANEY (1996): Quantitative measures of rearing and spawning habitat characteristics for stream-dwelling salmonids: guidelines for habitat restoration. - Province of British Columbia, Ministry of Environment, Lands and Parks, and Ministry of Forests. Watershed Restoration Project Report 4: 31 p.
- KELLER, E.A. & W.N. MELHORN (1978): Rhythmic spacing and origin of pools and riffles. – Geological Society of America Bulletin 89: 723-730.
- KEMP, P.S., T.A. WORTHINGTON, T.E.L. LANGFORD, A.R.J. TREE & M.J. GAYWOOD (2012): Qualitative and quantitative effects of reintroduced beavers on stream fish. – Fish and Fisheries 13: 158-181.
- KERN, K. (1994): Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung – Geomorphologische Entwicklung von Fließgewässern. – Springer, Berlin. 256 S.
- KERN, K. (2016): Störungen im Sedimenthaushalt – Folgen für die Habitatqualität und Gegenmaßnahmen. – Mskr. eines Vortrags bei der SVK-Binnenfischereitagung 07./08. März 2016 in Künzell bei Fulda. 17 S.
- KNIGHTON, D. (1998): Fluvial forms and processes: a new perspective. – Arnold, London.
- KOENZEN, U. (2005): Fluss- und Stromauen in Deutschland – Typologie und Leitbilder. – Angewandte Landschaftsökologie 65: 1-327.
- KOTTELAT, M. & J. FREYHOF (2007): Handbook of European freshwater fishes. – Kottelat, Cornol, Switzerland & Freyhof, Berlin, Germany. 646 S.
- KRAPPE, M., R. LEMCKE, L. MEYER & M. SCHUBERT (2012): Fisch des Jahres 2012: Die Neunaugen. - Verband Deutscher Sportfischer e.V. (Hrsg.), Offenbach a.M. 64 S.
- LANG, A., H.-R. BORK, R. MÄCKEL, N. PRESTON, J. WUNDERLICH & R. DIKAU (2003): Changes in sediment flux and storage within a fluvial system: some examples from the Rhine catchment. – Hydrological Processes 17: 3321-3334.
- LANUV (2015): Fließgewässertypenkarten Nordrhein-Westfalens. - LANUV-Arbeitsblatt 25. - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen.
- LEOPOLD, L.B., M.G. WOLMAN & J.P. MILLER (1964): Fluvial processes in geomorphology. – Freeman, San Francisco.
- LINSTEAD, C. & A.M. GURNELL (1999): Large woody debris in British headwater rivers: physical habitat role and management guidelines. - Research and Development, Technical Report W181. – Environment Agency, Bristol. 54 S.
- MAKASKE, B (2001): Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products. - Earth-Science Reviews 53: 149-196.

MAKASKE, B., E. LAVOOI, T. DE HAAS, M. G. KLEINHANS & D. G. SMITH (2017): Upstream control of river anastomosis by sediment overloading, upper Columbia River, British Columbia, Canada. - *Sedimentology*, doi: 10.1111/sed.12361

MESCHÉDE M. (2015): *Geologie Deutschlands - Ein prozessorientierter Ansatz*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.

MONTGOMERY, D.R., D.M. COLLINS, J.M. BUFFINGTON & T.B. ABBE (2002): Geomorphic effects of wood in rivers. - *American Fisheries Society Symposium*.

MUNLV Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (Hrsg.) (2003): *Handbuch zur naturnahen Entwicklung von Fließgewässern*. - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

NAIMAN, R.J., C.A. JOHNSTON & J.C. KELLEY (1988): Alteration of North American streams by beaver: the structure and dynamics of streams are changing as beaver recolonize their historic habitat. - *BioScience* 38: 753-761.

NAIMAN, R.J. & J.M. MELILLO (1984): Nitrogen budget of a subarctic stream altered by beaver (*Castor canadensis*). - *Oecologia* 62: 150-155.

NAIMAN, R.J., J.M. MELILLO & J.E. HOBBIÉ (1986): Ecosystem alteration of Boreal forest streams by beaver (*Castor canadensis*). - *Ecology* 67: 1254-1269.

NANSON, G.C. & A.D. KNIGHTON (1996): Anabranching rivers: their cause, character and classification. - *Earth Surf. Proc. Land.* 21: 217-239.

NELSON, P.A., A.K. BREW & J.A. MORGAN (2015): Morphodynamic response of a variable-width channel to changes in sediment supply. - *Water Resources Research* 51 (7): 5717-5734.

NZO GmbH & IfÖ Institut für angewandte Ökologie (2007): *Erarbeitung von Instrumenten zur gewässerökologischen Beurteilung der Fischfauna, Kapitel 9.6 (Steckbriefe Referenzen)*. - Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, 61 S.

PANDER, J. & M. MÜLLER (2012): *Verbesserung der Funktionalität von Fließgewässersubstraten*. - Gutachten im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. - Prof. Dr. J. Geist, Technische Universität München, Lehrstuhl für aquatische Systembiologie, München. 147 S.

PANDER, J., M. MUELLER & J. GEIST (2015): A comparison of four stream substratum restoration techniques concerning interstitial conditions and downstream effects. - *River Res. Applic.* 31: 239-255.

PIELER, F.J. (1875): *Aus den Acten der Kurfürstl. Regierung zu Arnsberg, Otter-und Biberfang im Herzogthum Westfalen betr., de anno 1800*. - Jahresbericht der zoologischen Section des Westfälischen Provinzial-Vereins für Wissenschaft und Kunst für 1874: 17-21.

POLLOCK, M.M., M. HEIM & D. WERNER (2003): Hydrologic and geomorphic effects of beaver dams and their influence on fishes. - *American Fisheries Society Symposium* 37: 2013-233.

POLLOCK, M.M., G. LEWALLEN, K. WOODRUFF, C.E. JORDAN & J.M. CASTRO (Eds.) (2015): *The Beaver Restoration Guidebook: Working with Beaver to Restore Streams, Wetlands, and Floodplains*. Version 1.02. - United States Fish and Wildlife Service, Portland, Oregon. 189 pp. Online at: <http://www.fws.gov/oregonfwo/ToolsForLandowners/RiverScience/Beaver.as>

- POLLOCK, M. M. & G. R. PESS (1998): The current and historical influence of beaver (*Castor canadensis*) on coho (*Oncorhynchus kisutch*) smolt production in the Stillaguamish River Basin. - 10, 000 Years Institute, Seattle.
- POLVI, L.E. & E. WOHL (2012): The beaver meadow complex revisited – the role of beavers in post-glacial floodplain development. - Earth Surface Processes and Landforms 37: 332–346.
- POLVI, L.E. & E. WOHL (2013): Biotic drivers of stream planform: implications for understanding the past and restoring the future. – BioScience 63: 439-452.
- PULG, U. (2007): Die Restaurierung von Kieslaichplätzen. - Landesfischereiverband Bayern e.V. (Hrsg.), München. 27 S.
- PULG, U. (2009): Laichplätze der Bachforelle (*Salmo trutta*) in der Moosach – die Bewertung ihrer Funktionsfähigkeit, ihre Degradierung und ihre Restaurierung. - Dissertation an der Technischen Universität München, 174 S.
- PULG, U. & J. SCHNELL (2011): Kieslaichplätze - ein vergessenes Habitat? - Laufener Spezialbeiträge 2011: 118-123.
- ROSGEN, D. (1996): Applied river morphology. – Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado.
- 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.
- Schälchli, Abegg + Hunzinger - dipl. Ing. ETH / SIA, Fluss- und Wasserbau (2002): Kolmation - Methoden zur Erkennung und Bewertung. – Gutachten im Auftrag der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG). - Schälchli, Abegg + Hunzinger, Zürich. 22 S.
- SCHLOEMER, S., L. DALBECK & A. HAMM (2012): The influence of the beaver (*Castor fiber*) on the dragonfly-fauna (Odonata) of the Northern Eifel (West Germany). – 6th International Beaver Symposium, Ivanic Grad, Croatia (Book of Abstracts): 118. - Zuletzt gesehen am 25.06.2019, [http://www.beaver.sumfak.hr/PDF/6thIBS\\_abstract%20book.pdf](http://www.beaver.sumfak.hr/PDF/6thIBS_abstract%20book.pdf)
- SCHNETTLER, F. (1895): Über das Vorkommen der letzten Biber in Westfalen. - Jahresbericht der zoologischen Sektion des Westfälischen Provinzial-Vereins für Wissenschaft und Kunst für 1894/95: 25-27.
- SCHUMM, S.A. (1969): River metamorphosis. - J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng. 1: 255-273.
- SCHUMM, S.A., (1981): Evolution and response of the fluvial system, sedimentological implications. - In: ETHRIDGE, F.G. & R.M. FLORES (eds.): Recent and nonmarine depositional environments. - SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication 31, Tulsa, OK: 19–29.
- SKUPIN, K. (1991): Der Löß des Hellwegs - Beobachtungen zur Altersstellung. - Spieker 35: 55-63.
- SKUPIN, K., mit Beitr. von B. JÄGER, G. MICHEL, F.K. SCHNEIDER & A. VIETH-REDEMANN (1995): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25 000, Erläuterungen zu Blatt 4316 Lippstadt. – Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 162 S.
- SKUPIN, K., mit Beitr. von M. HISS, U. KAPLAN, A. LENZ, G. MICHEL & K. STEUERWALD (2002): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1: 100 000, Erläuterungen zu Blatt C 4314 Gütersloh. 2., völlig neubearbeitete Auflage. – Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 120 S.

- SKUPIN, K., mit Beitr. von W. HORNIG, B. MEYER, B. OESTERREICH & P. WEBER (2004): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25 000, Erläuterungen zu Blatt 4315 Benninghausen. – Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 155 S.
- SKUPIN, K., mit Beitr. von B. JÄGER, G. MICHEL, F. K. SCHNEIDER & A. VIETH-REDEMANN (1995): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25 000, Erläuterungen zu Blatt 4316 Lippstadt. – Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 162 S.
- SKUPIN, K., E. SPEETZEN, J.G. ZANDSTRA (1993): Die Eiszeit in Nordwestdeutschland. – Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld. 143 S.
- SMITH, D.G. (1976): Effects of vegetation on lateral migration of anastomosed channels of a glacier meltwater river. - Geological Society of America Bulletin 87: 857-860.
- SOMMER, R., V. ZIARNETZKY, U. MESSLINGER & V. ZAHNER (2019): Der Einfluss des Bibers auf die Artenvielfalt semiaquatischer Lebensräume – Sachstand und Metaanalyse für Europa und Nordamerika. - Naturschutz und Landschaftsplanung 51: 108-115.
- STORM, T. (1888): Der Schimmelreiter. – Gebrüder Paetel, Berlin.
- STRAHLER, A.N. (1957): Quantitative analysis of watershed geomorphologie. – American Geophysical Union Transactions 38: 913-920.
- TERBERGER, T. & D. GRONENBORN (Hrsg.) (2014): Vom Jäger und Sammler zum Bauern: Die Neolithische Revolution. – Archäologie in Deutschland, Sonderheft 05/2014. – Theiss, Darmstadt. 112 S.
- THURMANN, C. & T. ZUMBROICH (2012): Resilienzvermögen von Interstitialräumen verschiedener Gewässertypen bezüglich Kolmation. – Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Abschlussbericht 2012, Förderkennzeichen: 363 01 387. Umweltbundesamt, Dessau- Roßlau. 100 S.
- TONINA, D. & J.M. BUFFINGTON (2009): A three-dimensional model for analyzing the effects of salmon redds on hyporheic exchange and egg pocket habitat. – Can. J. Fish. Aquat. Sci. 66: 2157-2173.
- WEBER, N., N. BOUWES, M.M. POLLOCK, C. VOLK, J.M. WHEATON, G. WATHEN J. WIRTZ & C.E. JORDAN (2017): Alteration of stream temperature by natural and artificial beaver dams. – PloS one 12.5: e0176313.
- WOHL, E. (2014): Rivers in the landscape: science and management. – Wiley Blackwell, Chichester. 318 S.
- WIESENDAHL, G. (2015): Hinweise auf ein mittelalterliches Hochwasserereignis in Hamm. – In: Eggenstein, G. (Hrsg.): Im Fluss Lippe – Kultur- und Naturgeschichte einer Flusslandschaft. – Lippstädter Spuren 25: 43-50.
- WÜSTEMANN, O. & B. KAMMERAD (1995): Der Hasel *Leuciscus leuciscus*. - Die Neue Brehm-Bücherei Bd. 614. - Westarp, Magdeburg. 195 S.
- ZBINDEN, E. (2011): Das Magdalenen-Hochwasser von 1342 – der „hydrologische Gau“ in Mitteleuropa. – Wasser, Energie, Luft – Fachzeitschrift für Wasserwirtschaft 103: 193-203.