



**DIPLOMARBEIT**  
Master Thesis

**Erosionsprozesse in Flüssen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.-Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Krouzecky

E 222

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Marin Stoev  
1229341

Krakra Str. 61/63  
2300 Pernik

Wien, im Juni 2015

## Danksagung

Ich bedanke mich bei allen meinen Freunden für die meist motivierende Aufforderung mein Studium abzuschließen.

Ich bedanke mich besonders bei allen meinen schon ehemaligen Studienkollegen und guten Freunden dafür, dass sie mir während des ganzen Studiums geholfen haben.

Ich bedanke mich selbstverständlich auch bei meinen Eltern dafür, dass sie mich immer unterstützt und auf allen möglichen Weisen mir geholfen haben.

Ich bedanke mich bei allen meinen Lektoren, die mir während meines ganzen Studiums unterweist und gelehrt.

Ich bedanke mich speziell bei Univ. Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dimitar Kislqkov, der mit mir in der Universität für Architektur, Bauingenieurwesen und Geodäsie auf die Diplomarbeit gearbeitet hat.

Mein größten Dank gilt zuletzt Ao.Univ.Prof.-Dipl.-Ing. Dr.techn. Nibert Krouzecky. Ich danke ihm für die engagierte Betreuung während der Erarbeitung und Erfassung dieser Diplomarbeit.

## Kurzfassung

Die flussmorphologischen Prozesse sind eine sehr komplizierte und in vielen Büchern breit erklärte Problematik. Das Ziel dieser Arbeit ist es nicht neue Theorien zu entwickeln, sondern die vorhandenen Denkansätze auf Basis von Literaturstudien und Fallbeispielen übersichtlich darzustellen.

Die vorliegende Arbeit bietet kurze, aber klare Formulierungen der wesentlichen Ursachen von Sohlerosionsprozessen natürlicher Flussläufe und stellt Methoden vor, mit deren Hilfe es gelingen kann, die Erosion zu verringern oder zu vermeiden. Ergänzend werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden dargestellt. Die Maßnahmen sind in zwei Hauptgruppen unterteilt und zwar in bautechnische und flussbauliche. Alle betroffenen Punkte werden ausführlich erläutert und durch Bilder, Skizzen und Fotos ergänzt, sodass eine bessere Vorstellung von der Problematik erhalten werden kann. Zum Schluss sind drei Beispiele zur Sohlstabilisierung gezeigt. Sie entsprechen verschiedenen vorher erklärten Methoden, die in Österreich schon ausgeführt wurden.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine kurze Zusammenfassung, die die wichtigsten Aspekte der Sohlerosion bzw. Sohlstabilisierung umfasst und Information darüber gibt.

## Abstract

The river morphological processes are very complicated and in many books widely stated problems. The aim of this study is not to develop new theories, but to represent the existing approaches based on literature studies and case studies clearly.

This paper provides concise and clear formulations of the main causes of bederosion in the natural rivers and introduces methods that help to reduce erosion or to avoid it. The advantages and disadvantages are shown for the individual methods. The measures are divided into two main sections namely to building and to river engineering. All points are explained and complemented by pictures, sketches and photos, so that a better idea of the problem can be obtained. Finally, three examples for river bed stabilization are shown. They meet several previously stated methods, which have already been carried out in Austria.

The result of this work is a brief summary, which includes the most important aspects of bed erosion and river bed stabilization and gives information about it.

## Inhaltverzeichnis

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>7</b>
1.1 Was ist die Flusserosion? .....	7
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit .....	8
<b>2. Flussmorphologisch relevante Prozesse.....</b>	<b>9</b>
2.1. Prozesse bei der Gewässersohlbildung.....	9
2.1.1 Klima.....	9
2.1.2 Geomorphologie.....	9
2.1.3 Natürliche Fließgewässerprozesse .....	10
2.1.3.1 Gewässerbettbildende Prozesse .....	10
2.1.3.2 Bettbildung durch Linienführung .....	11
2.2 Feststofftransport in Fließgewässern.....	14
2.2.1 Systematik .....	14
2.2.1.1 Transportarten .....	15
2.2.1.2 Physikalische Eigenschaften von Wasser und Feststoff, Korndurchmesser.....	16
2.2.2 Transportbeginn .....	16
2.2.3 Kritische Geschwindigkeit.....	17
2.2.4 Kritische Schubspannung.....	18
2.2.4.1 Sohlenschubspannung.....	18
2.2.4.2 Bewegungsbeginn .....	20
2.2.4.3 Transportkörper .....	22
2.2.4.4 Kohäsive Sohlen.....	22
2.2.4.5 Algenbewuchs .....	23
2.2.5 Geschiebetransportformeln .....	23
2.2.5.1 Formel von Einstein .....	24
2.2.5.2 Formel nach Meyer-Peter & Müller .....	24
<b>3. Möglichkeiten und Maßnahmen zur Sicherung gegen Erosionsvorgänge .....</b>	<b>26</b>
3.1 Bautechnische Maßnahmen .....	26
3.1.1 Stauhaltungen .....	26
3.1.1.1 Feste und bewegliche Wehre .....	26
3.1.1.2 Wasserkraftwerke .....	28
3.1.1.3 Fließgewässerkraftwerke .....	29
3.1.2 Sohlenbauwerke.....	31
3.1.2.1 Schwellen.....	31

3.1.2.2 Sohlenstufen.....	33
3.2 Flussbauliche Maßnahmen .....	35
3.2.1 Buhnen .....	35
3.2.2 Laufverlängerung.....	39
3.2.3 Sohlabflachung .....	40
3.2.4 Sohlrollierung bzw. Sohlpanzerung .....	41
3.2.5 Geschiebezugabe.....	43
3.2.6 Grobmaterialzugabe zur Deckschichtbildung.....	44
3.2.7 Querschnittsaufweitung.....	45
<b>4. Beispiele für Sohlstabilisierungen gegen Erosion .....</b>	<b>48</b>
4.1 Neue Donau.....	48
4.2 Salzach .....	51
4.3 Flussbauliches Gesamtprojekt Donau östlich von Wien .....	59
<b>Literatur und verwendete Unterlagen .....</b>	<b>66</b>
1. Literaturverzeichnis.....	66
2. Bilderverzeichnis .....	67
3. Tabellenverzeichnis .....	69

## 1. Einleitung

Als Erosion bezeichnet man im geowissenschaftlichen Sinn die Zerstörung bzw. Schaffung von Oberflächenformen durch die Abtragung von mehr oder weniger stark verwitterten Gesteinen. Hierbei wird im Wesentlichen zwischen linienhafter und flächenhafter Erosion unterschieden. Unter linienhafter Erosion versteht man die Eintiefung der Erdoberfläche durch abfließendes Wasser in kleinen, kurzlebigen Rinnsalen (Rillenerosion) oder in Fließgewässern (Flusserosion). Andererseits erfolgt flächenhafte Erosion durch Wind (äolisch), durch Meeresbrandung und -strömung (marin), durch Inlandeis (glazial) und auch direkt durch Niederschläge. [1]

### 1.1 Was ist die Flusserosion?

Flusserosion (fluviatile Erosion), eine lineare Erosionsform, ist die Schaffung von Einschnitten in die Landoberfläche durch die Tätigkeit von Fließgewässern. Die Wirkung des Gewässers ist am wesentlichsten abhängig von der:

- Wassermenge des Fließgewässers
- Wasserturbulenz und dem mitgeführten Material
- bestehenden Geländemorphologie (Gefälle)

Ausgangspunkt für jede fluviale Erosion ist ein Quellaustritt, von wo aus das Wasser, der Schwerkraft folgend, in tiefer liegendes Gelände fließt. Je größer das Gefälle ist, desto größer ist die Fließgeschwindigkeit des Wassers und desto stärker ist damit die Erosionswirkung.

Durch die Materialabführung schneidet sich der Fluss beständig weiter in Quellrichtung in den Untergrund ein. Dieser Vorgang heißt rückschreitende Erosion und kann in besonderen Fällen zur Flussanzapfung führen. [1]

Die mit der Erosionswirkung eines Fließgewässers einhergehende Vertiefung des Flussbettes wird als Tiefenerosion oder Sohlenerosion bezeichnet, seine Verbreiterung nach der Seite – als Seitenerosion. Bei schnell fließenden Gebirgsflüssen mit starkem Gefälle überwiegt die Tiefenerosion. Bei träge fließenden Flüssen mit geringem Gefälle überwiegt die Seitenerosion, was dann in der Regel zur Mäanderbildung führt.

Wegen der Abnahme des Gefälle eines Flusses in Richtung Mündung wird auch seine Fähigkeit zum Materialtransport immer geringer. Den stärksten Gefällsunterschied erfahren lange Flüsse, welche im Hochgebirge entspringen, dann eine Tiefebene durchqueren und schließlich ins Meer münden. Alles Material, für das die Transportkraft nicht mehr ausreicht, wird auf dem Weg von der Quelle zur Mündung im Flussbett abgelagert (Sedimentation). Die absolute Erosionsbasis eines Flusses ist das Höhenniveau, wo seine Erosionswirkung gleich Null ist. Im Flusslauf liegende Ebenen und Seen können jedoch lokale Erosionsbasen mit erhöhter Sedimentationsrate darstellen.

Über einen gegebenen geologischen Zeitraum kann es in einem Gebiet zu mehrfachem Wechsel zwischen Erosions- und Sedimentationsphasen kommen, entweder verursacht durch tektonische Hebungs- und Senkungsvorgänge der Erdkruste und deren Auswirkung auf das Flussgefälle oder die Anhebung oder Absenkung der absoluten Erosionsbasis durch Schwankungen des Meeresspiegels. Wenn der Fluss mehr sedimentiert als erodiert, werden diese periodischen Wechsel in der Sedimentabfolge durch das Auftreten von Erosionsdiskordanzen bezeichnet. Auf der anderen Seite, wenn es mehr erodiert als sedimentiert, existiert für den betrachteten Zeitraum keine Sedimentabfolge. [1]

## 1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es eine verallgemeinerte Literaturzusammenfassung über die Erosionsprozesse in den Flüssen darzustellen. Die vorliegende Arbeit ist in drei wesentliche Kapiteln unterteilt. Zu Beginn der Arbeit werden in Kapitel 2 die flussmorphologisch relevanten Prozesse vorgestellt. Dieses Kapitel entspricht zwei wichtigen Prozessen – der Sohlbildung und des Feststofftransports. Der Hauptteil – Kapitel 3, zeigt fast alle Methoden der Sohlstabilisierung. Sie sind durch zwei große Unterkapitel zu unterscheiden – Flussbauliche Maßnahmen und Bautechnische Maßnahmen. Der Teil der flussbaulichen Methoden ist am breitesten erarbeitet, weil sie den umweltfreundlicheren und meistens wirtschaftlicheren Lösungen entsprechen. Im Kapitel 4 werden schließlich drei Projekte vorgestellt. Es handelt sich dabei ausschließlich um österreichische, flussbauliche Projekte – zwei an der Donau und eines an der Salzach.

## 2. Flussmorphologisch relevante Prozesse

### 2.1. Prozesse bei der Gewässersohlbildung

Geologische und klimatische Einflussfaktoren im jeweils durchflossenen Naturraum bestimmen die Entwicklung der Fließgewässer. Langfristige Prozesse bilden den Rahmen, in den sich kurzfristige Abläufe einfügen. In einem natürlichen Fließgewässer sind Linienführung und Längsprofil vorwiegend durch das Relief geprägt, während Erosion, Transport und Sedimentation das Gewässerbett formen. Langfristige und kurzfristige Prozesse überlagern sich ständig und finden ihren Ausdruck in der Gewässer- und Auenmorphologie (Bild 2.1.). [2]

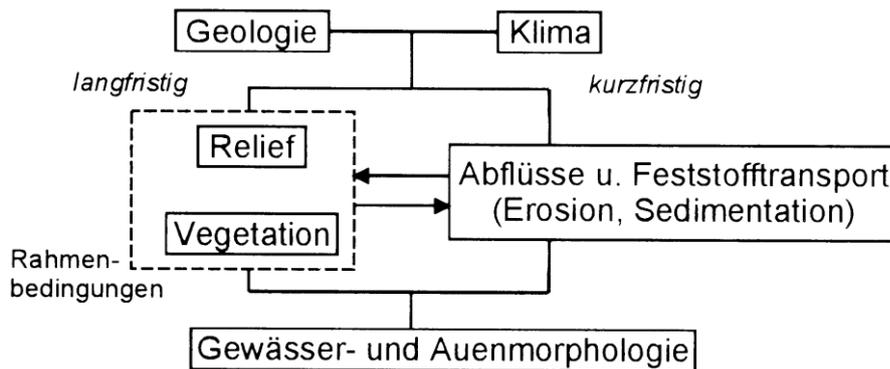


Bild 2. 1 Einflussfaktoren auf die Fließgewässerentwicklung (Quelle: Naturnaher Wasserbau, 2010)

#### 2.1.1 Klima

Das Klima ist der mittlere Zustand der Atmosphäre über einem festgelegten Gebiet. Elemente des Klimas sind Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Windrichtung, Windstärke, Bewölkung und Sonnenscheindauer. Aus der Breitengradabhängigen Strahlungsintensität und den jeweils typischen Zirkulationen ergeben sich gewisse Regelmäßigkeiten, die ihren Ausdruck in den unterschiedlichen Klimazonen finden (Trockenklimate, Regenwaldklimate usw.). Von besonderer Bedeutung für die unterschiedlichen Klimasysteme ist die atmosphärisch-ozeanische Zirkulation, in die auch der Wasserkreislauf eingebunden ist. [3]

Das Klima beeinflusst die Wasserwirtschaft. Deshalb werden Klimaänderungen der letzten Zeit immer häufiger als Grund für die Veränderungen der hydrologischen Parameter genannt (Stocker, 2003; Romero & Meuli, 2003). Heutzutage befinden wir uns in der Periode eines globalen Klimawandels, der sich auf die Regionen verschieden auswirkt und mit zahlreichen ökologischen Folgen verbunden ist (z.B. der Rückgang der Gletscher, das immer tiefere Auftauen der Permafrostböden im Hochgebirge, die Zunahme von meteorologischen Extremereignissen und die damit verbundenen Folgen wie Überschwemmungen, Dürreperioden und Lawinenabgänge).

#### 2.1.2 Geomorphologie

Die klimatischen Einwirkungen auf die geologischen Formationen prägen die Form der Erdoberfläche. Die Geomorphologie beschreibt die sich ausbildenden Formen, beschäftigt sich mit ihrer Entstehung und versucht, die Gesetzmäßigkeiten ihrer Verbreitung zu erklären. Enge Beziehungen bestehen daher auch zu Lithologie, Petrographie und Bodenkunde. Durch die Verbindung von oberirdischem und unterirdischem Wasser sind auch hydrogeologische Aspekte zu berücksichtigen. Die unterschiedlichen Talformen werden von den tektonischen Vorbedingungen, den Auswirkungen der Eiszeiten, von der Böschungsabtragung auf den Talflanken und dem Abtransport der Gesteinsmassen (fluviale Linearerosion) geprägt. An der weiteren Entwicklung der vorhandenen Morphologie sind Klimafaktoren und Standortfaktoren (Geologie, Geomorphologie, Boden,

Vegetation) gleichermaßen beteiligt.

Nach der Lockerung des Gesteinsgefüges erfolgt der Abtrag der Schuttmassen mittels Massenselbstbewegungen (Stürze, Rutschungen, Fließbewegungen) und Massenschurf (durch Schnee in Form von Lawinen, durch Wasser in Form von Rinnenerosion oder Tiefen- und Seitenerosion im Gewässer). Erosionen sind Massenverlagerungen von Böden, Lockergesteinen und Festgesteinen mittels Wind oder Wasser. Das Wasser ist in diesen Prozessen sowohl Lösungs- als auch Transportmedium.

### 2.1.3 Natürliche Fließgewässerprozesse

In den folgenden Unterkapiteln sollen nur die Einflüsse der abiotischen Faktoren auf die Fließgewässerentwicklung beschrieben werden. Die Zusammenhang dieser Faktoren mit den biotischen Parametern wird nochmals begründet.

#### 2.1.3.1 Gewässerbettbildende Prozesse

Der Energielieferant für alle abiotischen Vorgänge ist das im Verlauf eines natürlichen Fließgewässers mehr oder weniger kontinuierlich abnehmende Gefälle. Die sich ständig wiederholenden Prozesse Erosion, Transport und Sedimentation prägen die Fließgewässerentwicklung und spiegeln sich in der Linienführung, im Längsschnitt, in der unterschiedlichen Ausformung der Querschnitte sowie in der Ausstattung der Gewässersohle wider. Die Versorgung der Fließgewässer mit Feststoffmaterialien hängt von den Verhältnissen im Einzugsgebiet und vom Transportvermögen der Strömung ab. Das Bettmaterial selbst stammt aus Feststoffherden im Oberlauf, von der Gewässersohle (Tiefenerosion) und von den seitlichen Berandungen (Seitenerosion). Das Material wird vom Wasser gelöst, aufgenommen und transportiert. Fließgewässer mit einem Überschuss an Strömungsenergie tiefen sich bevorzugt ein, da die angreifenden Kräfte an der Sohle am größten sind.



*Bild 2. 2 Prall- und Gleitufer (Quelle: Landschaftswasserbau und Flussmorphologie, Honsowitz)*

In einem natürlichen Fließgewässer führt die Tiefenerosion zur Ausbildung von Kolken, Stromschnellen, Kaskaden und Wasserfällen. Die Seitenerosion fördert die Bildung von Steilhängen an den Prallufeln (Bild 2.2). Diese werden nach einiger Zeit unterspült, brechen ab (Böschungsabbrüche) und werden anschließend von der Strömung abtransportiert. Auf diese Weise kommt es in diesen Bereichen zu einer allmählichen Verbreiterung des Gewässerbettes.

In einem natürlichen Fließgewässer werden diese Prozesse zusätzlich von den Schwankungen des Wasserangebotes überlagert. In Niedrigwasserzeiten lagern sich Feststoffe im Gewässerbett ab, wo

sie eine Ablenkung der Strömung bewirken und sich bei höheren Abflüssen wieder in Bewegung setzen. Alle Gewässerbettstrukturen weisen daher mehr oder weniger ausgeprägte räumliche und zeitliche Komponenten auf. [4]

### 2.1.3.2 Bettbildung durch Linienführung

In Abhängigkeit von Längsentwicklung und Gefälle wird die gesamte Fließstrecke eines Gewässers in Quellbereich, Oberlauf, Mittellauf, Unterlauf und Mündungsbereich eingeteilt.

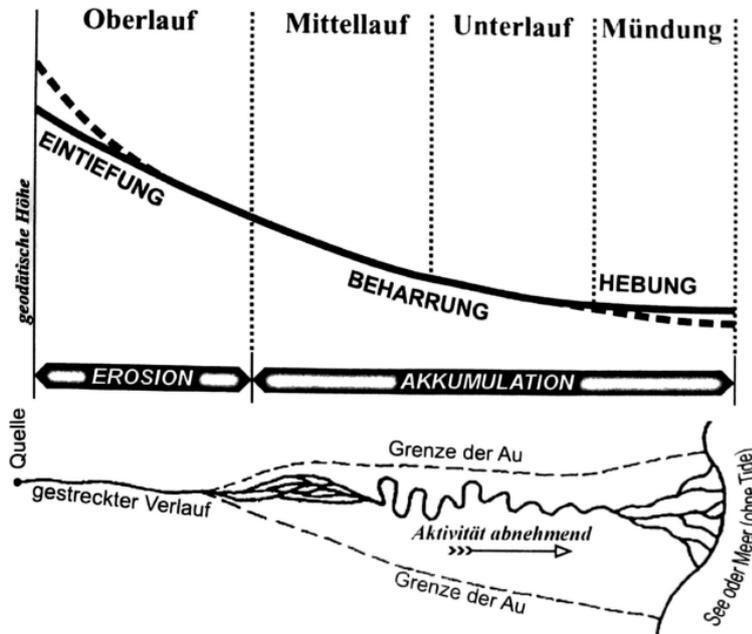


Bild 2. 3 Akkumulationsstrecken (Quelle: Landschaftswasserbau und Flussmorphologie, Honsowitz)

Sieht man von Quelle und Mündung ab, präsentiert sich die Linienführung im Grundriss oft als ein mehr oder weniger ausgeprägter Wechsel von Prall- und Gleituferstrukturen.

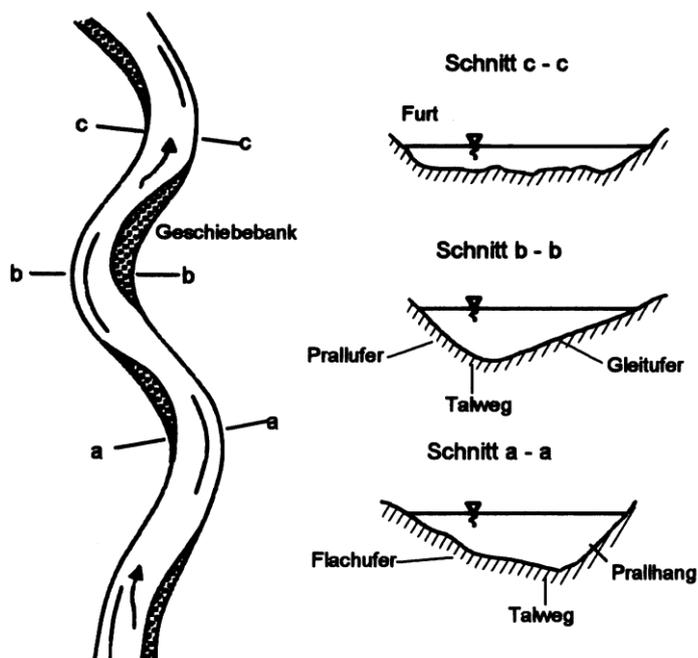


Bild 2. 4 Linienführung – Wechsel von Prall- und Gleituferr in einem Fließgewässer (Quelle: Landschaftswasserbau und Flussmorphologie, Honsowitz)

Die Beziehung zwischen Gefälle, bordvollem Abfluss und Linienführung ist in Bild 2.5 dargestellt. Im Oberlauf (starkes Gefälle) ist die Linienführung mehr oder weniger „gestreckt“, der Mittellauf ist „gewunden“ oder „verästelt“ und der Unterlauf (geringes Gefälle) zeigt „mäandrierende“ (Bild 2.5) oder „verzweigte“ Laufformen.

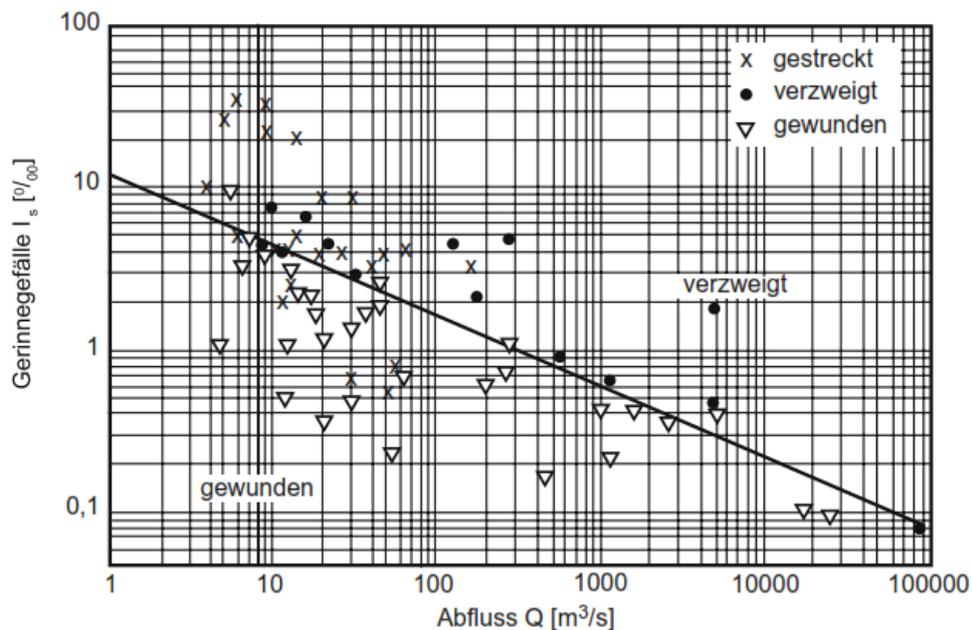


Bild 2.5 Laufentwicklung in Abhängigkeit vom Gefälle und bordvollem Abfluss (nach Leopold & Wolmann, 1957)



Bild 2.6 Mäandrierendes Fließgewässer.

Im Oberlauf ist das Bettmaterial überwiegend grob (Blöcke, Steine usw.) und wird fast ausschließlich sohlennah als Geschiebe transportiert. Im Unterlauf dominieren die feineren Materialien (Feinböden, wie z. B. Schluffe, Tone). Diese werden vorwiegend in Form von Schwebstoff bewegt. (siehe 2.2.1.1) Neben dem Gefälle und der davon abhängigen Transportkapazität haben die verfügbaren Feststoffmaterialien erheblichen Einfluss auf die Laufentwicklung der Fließgewässer. Bei geringer Feststofffracht ist die Linienführung auch bei wenig Gefälle weitgehend gestreckt. Mit zunehmender Feststofffracht wird die Laufentwicklung vor allem durch die Umlagerungen im Gewässerbett

beeinflusst. Die Lauform geht daher mit abnehmendem Gefälle von einem verästelten zu einem verzweigten Verlauf über (Bild 2.7). Mit geringerem Sohlegefälle steigt die Tendenz zur Ausbildung von Mäandern (Gewässerschleifen). Diese ändern bei fortschreitender Erosionstätigkeit des Fließgewässers ständig ihre Form, bis es zuletzt im Bereich der Prallufer zum Durchbruch der Gewässerschleifen kommt.

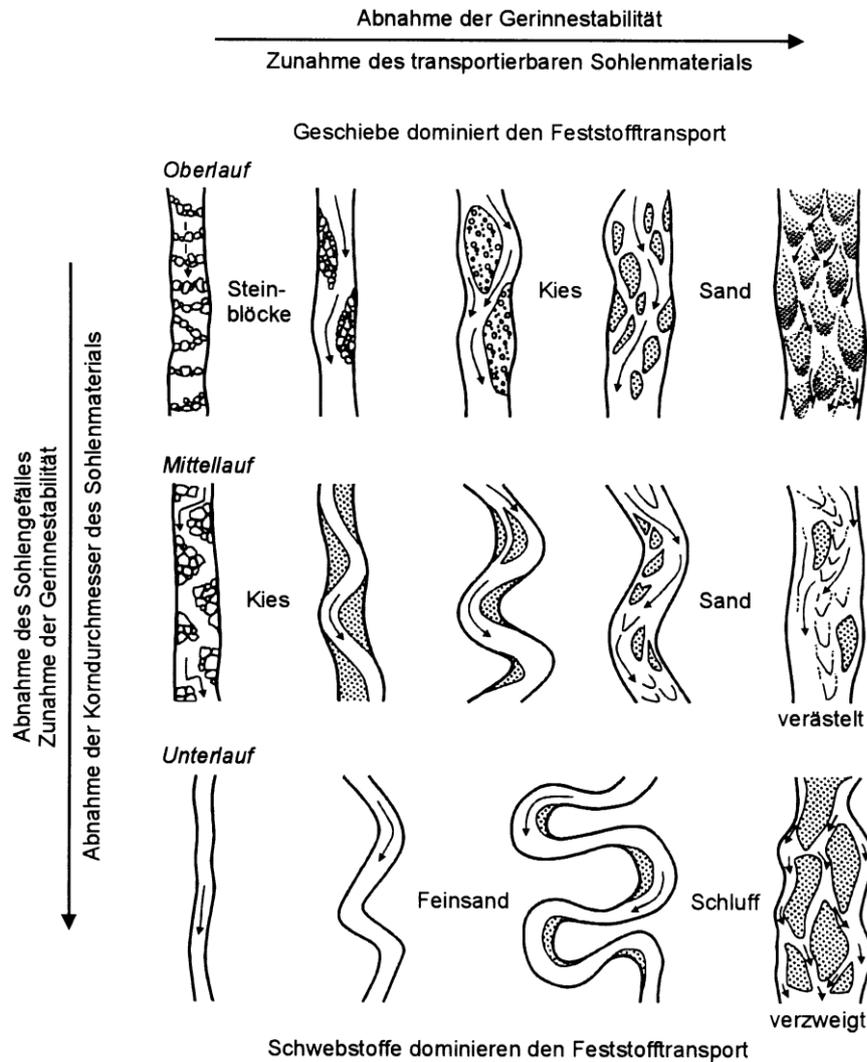


Bild 2.7 Lauformen von Fließgewässern (Quelle: Landschaftswasserbau und Flussmorphologie, Honsowitz)

## 2.2 Feststofftransport in Fließgewässern

Die Laufentwicklung eines natürlichen Fließgewässers wird maßgeblich von den Feststofftransportvorgängen geprägt. Das permanente Zusammenspiel von Strömung und Relief, die Wirkungen wechselnder Abflüsse auf Erosion, Transport und Ablagerung sowie die Auswirkungen von Störungen (z. B. durch das Wurzelwerk von Bäumen und Sträuchern) sind die Gründe, warum sich in natürlichen Fließgewässern die vielfältigsten Strukturen ausbilden.

An der Vielzahl empirischer Parameter in den Berechnungsformeln zum Feststofftransport spiegelt sich wider, dass viele Zusammenhänge immer noch nicht abschließend geklärt sind. Da die Einflussparameter sehr unterschiedlich sind, und sich dazu noch ständig verändern, werden auch zukünftige Formeln nur unter ganz speziellen Voraussetzungen ableitbar sein. Bei allen Betrachtungen zum Feststofftransport sollte man daher keine exakten Rechenergebnisse erwarten, sondern vielmehr die grundsätzlichen Zusammenhänge im Auge behalten. [Naturnaher Wasserbau, 2010]

Neben den Transportprozessen spielen auch ökotoxikologische Gesichtspunkte eine bedeutende Rolle, da sich viele Schadstoffe mit den Sedimenten abgelagert haben und heute in unseren Flüssen eine erhebliche Altlast darstellen können.

### 2.2.1 Systematik

Die Systematik des Feststofftransportes ist schematisch in Bild 2.8 dargestellt. Ausgehend vom jeweiligen Feststoffherd sorgen chemische Prozesse, Erosion und Schwerkraft für die Versorgung der Fließgewässer mit entsprechenden Feststoffmaterialien.

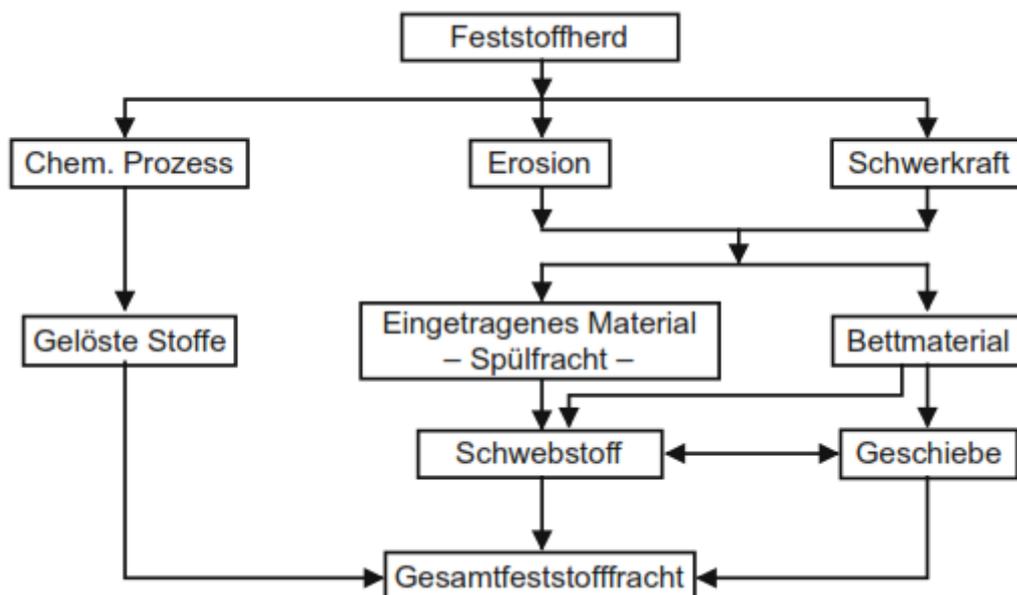


Bild 2. 8 Schema zum Feststofftransport (ohne Schwimmstoffe) (Quelle: Naturnaher Wasserbau, 2010)

Je nachdem, ob die Feststoffzufuhr größer oder kleiner als das Feststofftransportvermögen des Fließgewässers ist, kommt es zur Akkumulation oder zur Erosion an der Sohle. In der folgenden Tabelle sind Flussregimetypern in Abhängigkeit von den Zustandsformen und den Kennzeichen des Feststoffhaushaltes dargestellt.

Tabelle 2. 1 Flussregime-Typen

<i>Regime-Typ</i>	<i>Zustandsform</i>	<i>Kennzeichen des Feststoffhaushalts</i>	<i>Gerinne-Reaktion</i>
<b>I</b>	<b>Beharrung</b>	Feststoffzufuhr = Feststoffabgabe (mit Bettmaterialaustausch)	–
<b>II</b>	<b>Alluvion</b>	Feststoffzufuhr > Feststoffabgabe (mit Bettmaterialaustausch)	<b>Akkumulation</b> (Zunahme d. Feststoffrückhalts)
<b>III</b>	<b>Erosion</b>	Feststoffzufuhr < Feststoffabgabe (mit Bettmaterialaustausch)	<b>Eintiefung</b> (Abnahme d. Feststoffrückhalts)
<b>IV</b>	<b>Latente Erosion</b>	Feststoffzufuhr = Feststoffabgabe (ohne Bettmaterialaustausch)	<b>Quasi-Gleichgewichts-Verhältnis</b>

(Quelle: Landschaftswasserbau und Flussmorphologie, Honsowitz)

Hinsichtlich der Herkunft der Materialien ist zwischen eingetragendem Material (Spülfracht) und Bettmaterial zu unterscheiden. Die feinkörnige Spülfracht wird fast ausschließlich in Form von Schwebstoff (Suspension) transportiert. Das Bettmaterial ist den Prozessen Erosion, Transport, Sedimentation und Resuspension ausgesetzt und ist in Abhängigkeit von Abfluss, Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Gefälle, Korngröße und Korngrößenverteilung, entweder als Geschiebe oder als suspendiertes Bettmaterial (Schwebstoff) vertreten.

#### 2.2.1.1 Transportarten

Geschiebe und Schwebstoffe sind ungelöste Stoffe. Diese stammen aus dem Einzugsgebiet des Gewässers, aus seitlichen Zuflüssen oder aus dem Sohlen- und Ufersubstrat. Die Übergänge und Grenzen zwischen den einzelnen Transportarten sind nicht immer klar bestimmbar.

*Schwebstofftransport.* Beim Schwebstofftransport bewegen sich die Feststoffteilchen ohne Sohlenkontakt in der Strömung mit. Für diese Transportart sind die Sinkgeschwindigkeit der Feststoffe, d. h. Korndurchmesser, Korndichte, Kornform und Dichte des Wassers, und die Strömungsparameter - Geschwindigkeitsverteilung im Gerinne und die Turbulenz, die maßgeblichen Einflussfaktoren.

In stehenden Gewässern (Seen und Stauraumhaltungen) und Bereichen mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten (schwach durchströmte Bereiche) können durch Schwebstoffablagerungen beträchtliche Verlandungen entstehen. Im naturnahen Wasserbau werden diese auch künstlich herbeigeführt (z. B. durch Paralleleinbauten), um in den Gewässern spezielle Lebensräume zu schaffen.

Im Unterlauf eines Fließgewässers hat der Schwebstofftransport nur geringen Einfluss auf die gewässermorphologischen Strukturen, obwohl Schwebstoffe dort den weitaus größten Teil des transportierten Materials ausmachen. [Quelle: Naturnaher Wasserbau, 2010].

*Geschiebetransport.* Der Geschiebetransport spielt sich in den sohlennahen Bereichen ab und ist deshalb einer der wichtigsten Faktoren bei der Ausformung des Gewässerbettes. Er hängt im wesentlichen vom Abfluss, Gefälle, Sohlenaufbau und vom Feststoffdargebot ab. Erosions- und Sedimentationsvorgänge wechseln in einem naturbelassenen Fließgewässer ständig einander ab und charakterisieren den Geschiebehaushalt einer Gewässerstrecke.

Anthropogene Beeinflussungen haben erheblich dazu beigetragen, dass die natürliche Versorgung der Fließgewässer mit Feststoffmaterialien in vielerlei Hinsicht gestört ist. Dies gilt insbesondere dann, wenn Laufkorrekturen durchgeführt oder Stauanlagen gebaut wurden. Es kann davon ausgegangen werden, dass nahezu alle Eingriffe des Menschen in den natürlichen Geschiebehaus-

halt wasserbauliche Folgemaßnahmen bedingen. [3]

*Schwimmstoffe.* Schwimmstoffe sind meist organischen Ursprungs und bewegen sich schwimmend auf der Wasseroberfläche oder oberflächennah mit der Strömung. Dazu zählen u. a. von der Strömung losgerissene Bäume und Sträucher, die noch biologisch aktiv (d. h. ausschlagfähig) sind, aber auch nicht mehr ausschlagfähige Materialien, so genanntes Totholz.

Schwimmstoffe haben vor allem hinsichtlich der Strukturvielfalt eine besondere Bedeutung. Dazu gehören u. a. die Ablenkung der Strömung sowie die Einleitung und Unterstützung der Tiefen- und Seitenerosion. Schwimmstoffe können die Abflussleistung eines Gerinnes erheblich reduzieren. Das gilt insbesondere dann, wenn sie in Form von Verkläusungen den vorhandenen Fließquerschnitt einschränken. Hinter derartigen Hindernissen können sich tiefe Kolke ausbilden, die die Sohlenstrukturen auf weite Strecken dominieren. Diese Mechanismen werden bei bestimmten Bauweisen des naturnahen Wasserbaus genutzt

*Gelöste Stoffe.* In der Hydrologie bezeichnet man als Advektion den Transport eines im Wasser gelösten Stoffes mit der Strömung des Wassers, also mit dessen mittlerer Geschwindigkeit und Richtung. Der Transport von im Wasser gelösten Stoffen hängt von einer Vielzahl an Prozessen im Wasser selbst und zwischen im Wasser gelösten Stoffen und dem umgebenden Feststoff ab. Die größte Bedeutung hat die Advektion, d.h. der Transport einer gelösten Substanz mit der Grundwasserströmung.

#### 2.2.1.2 Physikalische Eigenschaften von Wasser und Feststoff, Korndurchmesser

Neben der Dichte  $\rho_w$  und der kinematischen Zähigkeit  $\nu_w$  des Wassers (beide abhängig von der Temperatur) sind die Dichte des Feststoffes  $\rho_f$  und dessen Korngrößenverteilung von entscheidender Bedeutung für den Feststofftransport.

Als Eingangsgröße für die Berechnungsformeln dient ein charakteristischer Korndurchmesser  $d_{ch}$ , der die Eigenschaften des Korngemisches widerspiegeln soll. In der Transportfunktion nach Meyer-Peter & Müller – wird z. B. als charakteristischer Korndurchmesser der mittlere Korndurchmesser  $d_m$  verwendet. [2]

#### 2.2.2 Transportbeginn

Aufgrund der natürlichen Ausgangsbedingungen (z. B. Aufbau der Sohle, Strömung) ist der Beginn des Feststofftransportes stark vom subjektiven Empfinden des Beobachters abhängig und daher oft nicht eindeutig zu bestimmen.

Größere Körner sind der Strömung stärker ausgesetzt, halten dafür aber größeren Strömungskräften stand. Kleinere Körner werden zwischen den größeren abgeschirmt, so genannter „Hiding-Effekt“, haben aber einen kleineren Erosionswiderstand. Diese sich aufhebenden Einflüsse führen dazu, dass sich mehrere Fraktionen eines Korngemisches gleichzeitig in Bewegung setzen. Die Angabe eines charakteristischen Korndurchmessers für die Berechnung entspricht daher durchaus den natürlichen Gegebenheiten beim Transportbeginn.

Der überwiegende Teil der Messdaten, die zur Ableitung von Transportformeln verwendet werden, stammt aus Laboruntersuchungen. Rechnerisch kann der Bewegungsbeginn über *die kritische Geschwindigkeit* oder *die kritische Schubspannung* ermittelt werden.

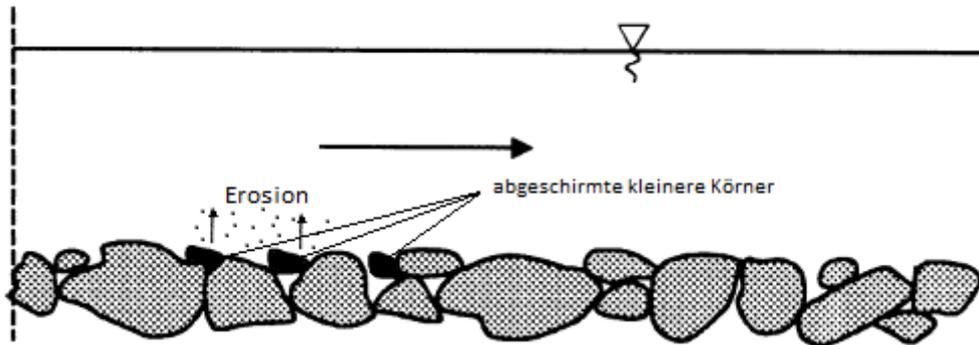


Bild 2. 9 Hiding-Effekt bei der Ausbildung der Gewässersohle (Quelle: Naturnaher Wasserbau)

### 2.2.3 Kritische Geschwindigkeit

Hjulström hat den Bewegungsbeginn von Quarzsand in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit  $v_m$  und dem charakteristischen Korndurchmesser  $d_{ch}$  dargestellt (Bild 2.10). Das Diagramm gilt nur für weitgehend ebene Gewässersohlen und für Wassertiefen größer als 1 Meter. Es wird empfohlen, das Diagramm nur bis  $d \approx 0,1$  mm zu benutzen, da der Transportbeginn von kohäsiven Materialien nicht erfasst wird.

Aufgrund der Unsicherheiten bei der Festlegung des Bewegungsbeginns ist dieser durch ein „Band“ gekennzeichnet. Oberhalb des „Bandes“ liegt der Bereich „Bewegung“, darunter der Bereich „Ruhe“. Durch Verwendung der oberen (hohe Bewegungswahrscheinlichkeit) oder unteren Grenzkurve (niedrige Bewegungswahrscheinlichkeit) kann das Bewegungsrisiko näherungsweise berücksichtigt werden.

Eine dimensionsreine empirische Beziehung, mit der die kritische mittlere Geschwindigkeit  $v_{m,cr}$  unter Berücksichtigung von Wassertemperatur und Adhäsion bestimmt werden kann, wurde von Zanke entwickelt. [5]

Die Gleichung lautet:

$$v_{m,cr} = 2,8 \cdot (\rho' \cdot g \cdot d_{ch})^{0,5} + 14,7 \frac{\nu}{d_{ch}} \cdot c_a \quad [\text{m/s}]$$

mit:

$v_{m,cr}$  kritische mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

$\rho'$  relative Feststoffdicht  $\left( \rho' = \frac{\rho_F - \rho_w}{\rho_w} \right) [-]$

$g$  Fallbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$d_{ch}$  charakteristischer Durchmesser [m]

$\nu$  Zähigkeit des Wassers [m<sup>2</sup>/s]

$c_a$  Adhäsion (für natürliche Sande  $c_a = 1$ )

Die Formel gilt für Wassertiefen  $h$  zwischen 0,7 und 2,0 Meter. Für natürliche Sande ist die Adhäsion  $c_a = 1$ . Liegen die Wassertiefen außerhalb des angegebenen Bereichs, kann die kritische mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_{m,cr}$  mit dem Faktor an die vorhandene Wassertiefe  $h_{vorh}$  [m] angepasst werden.

$$\left( \frac{h_{vorh}}{1,4} \right)^{1/6}$$

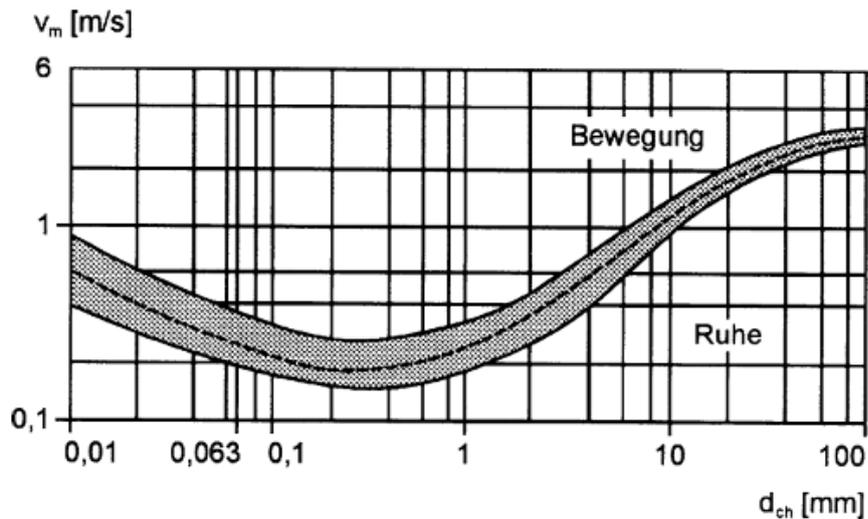


Bild 2. 10 Bewegungsbeginn für Quarzmaterial (nach Hjulström, 1935; aus DVWK, 1992a)

#### 2.2.4 Kritische Schubspannung

Die auf das Gewässerbett wirkende Schubspannung ist nicht gleichmäßig über den gesamten Fließquerschnitt verteilt, sondern weist, in Abhängigkeit vom Gerinneprofil, eine besondere Charakteristik auf. Zu unterscheiden ist zwischen den Schubspannungen an den seitlichen Berandungen (Wände oder Böschungen) und der Fließgewässersohle. In einem Trapezprofil wird sich beispielsweise in etwa eine Verteilung wie in Bild 2.11 dargestellt einstellen.

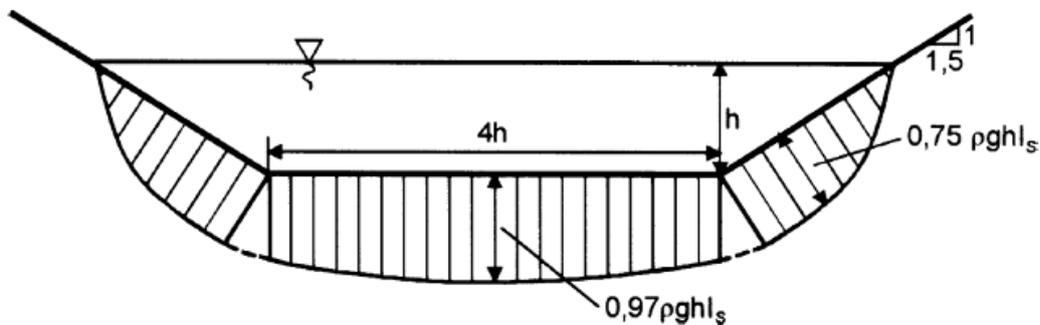


Bild 2. 11 Verteilung der Schubspannung in einem trapezförmigen Gerinnequerschnitt (Quelle: Naturnaher Wasserbau)

##### 2.2.4.1 Sohlenschubspannung

Die klassische Ableitung für die an der Gewässersohle wirkende Schubspannung (Sohlenschubspannung) beruht auf einem Gleichgewichtsansatz an dem in Bild 2.11 dargestellten Wasserkörper.

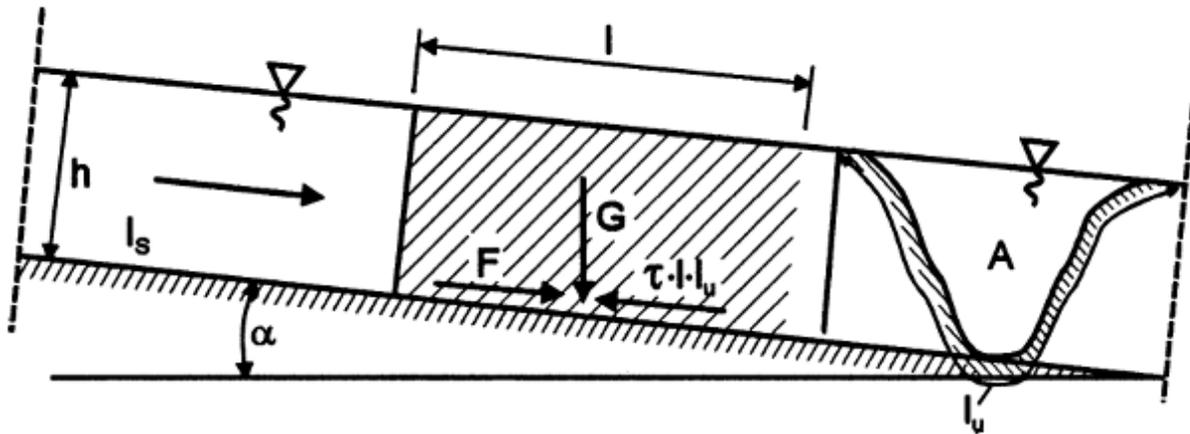


Bild 2. 12 Schema zum Schubspannungsansatz im Gewässerbett (Quelle: Naturnaher Wasserbau)

Die Gewichtskraft des Wasserkörpers G ergibt sich aus:

$$G = l \cdot A \cdot \rho_w \cdot g \quad [\text{N}]$$

mit:

- G Gewichtskraft des Wasserkörpers [N]
- l Länge des Wasserkörpers [m]
- A Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]
- $\rho_w$  Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]
- g Fallbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]
- h Wassertiefe

Die Komponente der Gewichtskraft F des Wasserkörpers in Fließrichtung beträgt (bei kleinen Winkeln  $\alpha$  kann vereinfacht  $\sin \alpha \approx l_s$  angenommen werden):

$$F = G \cdot \sin \alpha \approx G \cdot l_s = l \cdot A \cdot \rho_w \cdot g \cdot l_s \quad [\text{N}]$$

mit

$$l_s \text{ Sohlgefälle [-]}$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung  $F = \tau \cdot l \cdot l_u$  ergibt sich

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot r_{hy} \cdot l_s \quad [\text{N/m}^2]$$

mit

$$r_{hy} = A / l_u \text{ hydraulischer Radius [m]}$$

$$l_u \text{ benetzter Umfang [m]}$$

Für breite (Rechteck-) Gerinne gilt (Gerinnebreite  $b > 30h$ ):

$$r_{hy} = \frac{b \cdot h}{b + 2 \cdot h} \approx \frac{b \cdot h}{b} = h \quad [\text{m}]$$

Damit vereinfacht sich zu

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot l_s \quad [\text{N/m}^2]$$

Mit Hilfe dieser Beziehung lässt sich die für den Transportbeginn maßgebliche Schubspannung  $\tau$  bestimmen. Wenn die vorhandene Sohlenschubspannung  $\tau$  einen kritischen Wert  $\tau_{cr}$  überschreitet, setzt sich theoretisch das Sohlenmaterial in Bewegung.

#### 2.2.4.2 Bewegungsbeginn

Shields hat die auf die Kornrauheit der Sohle wirkenden Kräfte bilanziert und in dimensionsloser Schreibweise dargestellt. Dieses Diagramm wurde von Zanke auf Bereiche geringerer Schubspannungen erweitert und mit Angaben über die Wahrscheinlichkeit des Bewegungsbeginns versehen.

Der kritischen Schubspannung nach Shields wurde eine Bewegungswahrscheinlichkeit von 10 Prozent zugeordnet. Das bedeutet, dass 10 Prozent der Körner an der Gerinnesohle in Bewegung sind. Als Eingangsgrößen für Bild 2.13 werden folgende dimensionslose Kennzahlen benötigt:

Feststoff-Reynoldszahl  $Re^*$ :

$$Re^* = \frac{v_0^* \cdot d_{ch}}{\nu} \quad [-]$$

Feststoff-Froudezahl  $Fr^*$ :

$$Fr^* = \frac{v_0^{*2}}{\rho' \cdot g \cdot d_{ch}} \quad [-]$$

Sedimentologischer Durchmesser  $D^*$ :

$$D^* = \left( \frac{\rho' g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_{ch} = \left( \frac{Re^{*2}}{Fr^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [-]$$

Relative Feststoffdichte  $\rho'$ :

$$\rho' = \frac{\rho_F - \rho_w}{\rho_w} \quad [-]$$

Die Schubspannungsgeschwindigkeit  $v_0^*$  an der Sohle beträgt:

$$v_0^* = \sqrt{t_0 / \rho_w} = \sqrt{g \cdot r_{hy} \cdot l_s} \quad [m/s]$$

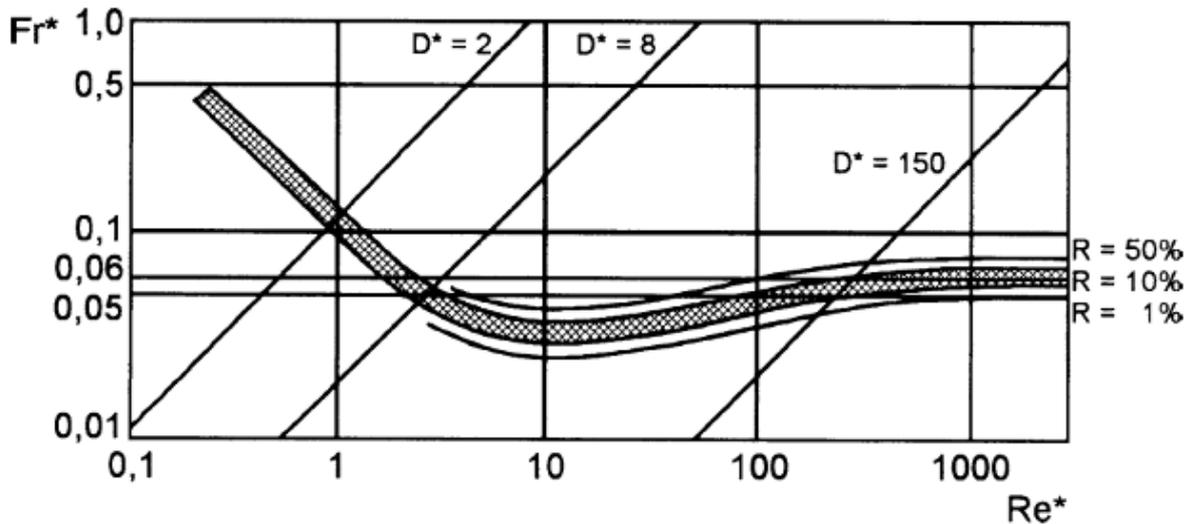


Bild 2. 13 Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos nach Zanke. (Quelle: Landschaftswasserbau und Flussmorphologie, Honsowitz)

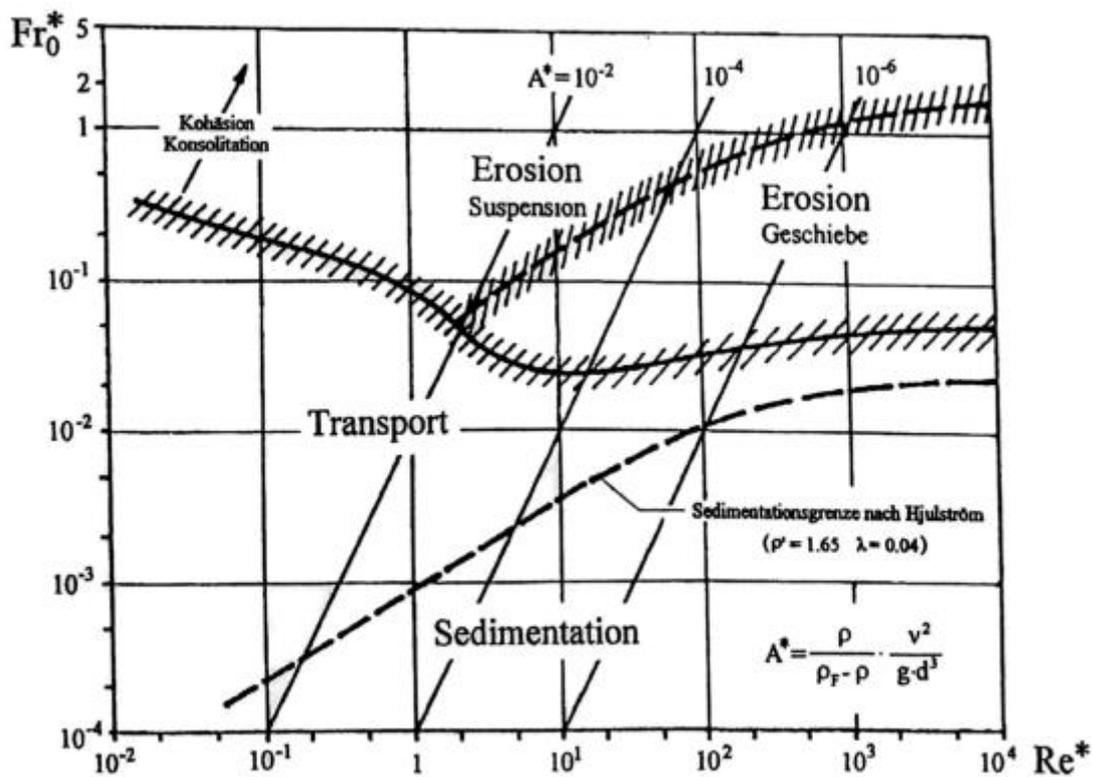


Bild 2. 14 Erweitertes Shields-Diagramm mit Bereichen für verschiedene Mobilitätszustände (Quelle: Landschaftswasserbau und Flussmorphologie, Honsowitz)

Im hydraulisch glatten Bereich gilt  $Fr^* \approx 0,1/Re^*$ , d. h. Zähigkeitskräfte dominieren. Im hydraulisch rauhen Bereich, etwa ab  $Re^* > 300$  bzw.  $D^* \approx 150$ , ist  $Fr^*$  nicht mehr von  $Re^*$  abhängig. In diesem Bereich sind Druckkräfte und Formwiderstände für den Transportbeginn maßgebend. Zwischen den beiden Bereichen liegt eine Übergangszone. Die untere Gültigkeitsgrenze des Shields-Diagramms liegt bei  $D^* \approx 1$ , d. h.  $d_{ch} \approx 0,05$  mm.

### 2.2.4.3 Transportkörper

Hat sich das Feststoffmaterial in Bewegung gesetzt, bildet sich, in Abhängigkeit von den sedimentologischen und hydraulischen Einflüssen, eine der in Bild 2.15 dargestellten Sohlenformen aus, denen entsprechende Fließwiderstände zuordenbar sind. Bei veränderten Bedingungen passt sich die Strömung an, die ihrerseits von dem natürlichen Abflussdargebot abhängig ist. Die intensive Verzahnung von Strömung und Gewässerbett ist auch hier wieder deutlich zu erkennen.

Riffeln sind kleine Sohlenunebenheiten von unregelmäßiger Form, Abmessungen im Zentimeter- und Dezimeterbereich. Die Größenordnung von Dünen liegt dagegen im Dezimeter- und Meterbereich. Riffeln und Dünen bewegen sich stets in Strömungsrichtung, während die bei schießendem Abfluss ( $Fr > 1$ ) auftretenden Antidünen gegen die Strömung wandern.

Die Wechselwirkungen von Strömung und Transportkörper ist der Gegenstand von hydraulisch-sedimentologischen Berechnungen. Dazu wird die hydraulische Berechnung (vorzugsweise nach Darcy-Weisbach)

$$v_m = \sqrt{\frac{1}{\lambda} \cdot 8 \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_E}$$

mit einer Feststofftransportberechnung gekoppelt. Damit ist es möglich, sowohl den Ist-Zustand als auch die Veränderungen von Abflussleistung und Geschiebetrieb nach einer Umgestaltungsmaßnahme abzuschätzen. Zusätzlich sind langfristige Prognosen über die morphologische Veränderung der Gewässersohle möglich.

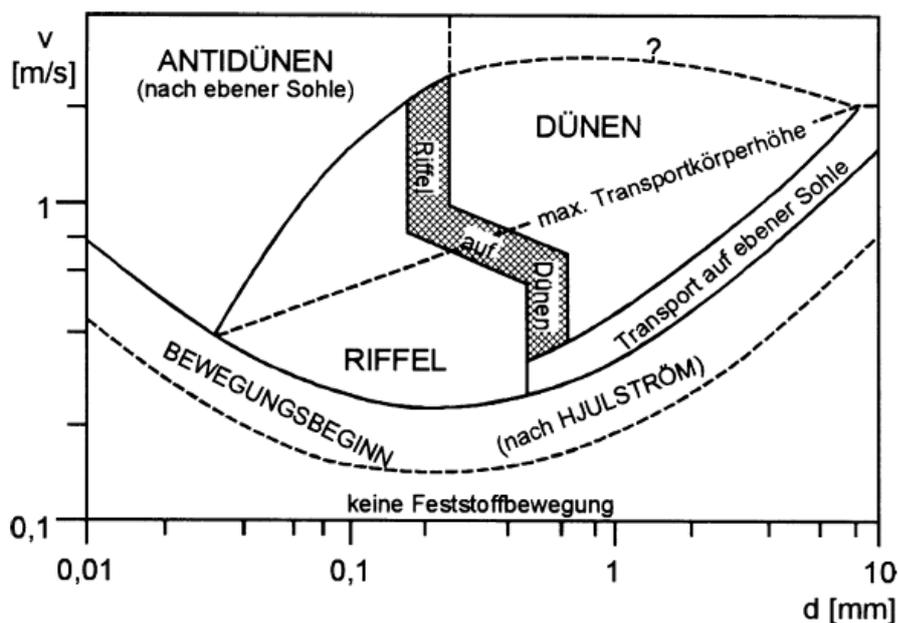


Bild 2. 15 Sohlenformen in Abhängigkeit von sedimentologischen und hydraulischen Einflussgrößen – Quarzmaterial – ( $\rho_f = 2650 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (nach Zanke)

### 2.2.4.4 Kohäsive Sohlen

Die bisherigen Ausführungen und Bestimmungsgleichungen für den Bewegungsbeginn und den Feststofftransport galten für nichtkohäsive Sohlen, also typische Sand- und Kiessohlen. Im Falle kohäsiver Sohlenmaterialien (Ton, Lehm u. ä.) wird die kritische Geschwindigkeit  $v_{m,cr}$  größer, d. h. die Sohle wird stabiler. Für kohäsive Sedimente werden in Tabelle 2.2 aufgeführten Werte angegeben.

Tabelle 2. 2 Schätzwerte für die mittlere kritische Geschwindigkeit  $v_{m,cr}$  für kohäsive Sedimente

Bodenart	Wassertiefe h	Mittlere kritische Geschwindigkeit $v_{m,cr}$
	[m]	[m/s]
Lehmiger Sand, lehmiger Ton, nicht verfestigt	1,0	0,4
Schwach lehmiger Sand, mittlere Verdichtung	1,0	0,8
Schwach lehmiger Ton, fest	1,0	1,2
Stark lehmiger Ton, geringe Dichte	3,0	0,5
Stark lehmiger Ton, mittlere Dichte	3,0	1,0
Schwerer lehmiger Ton, fest	3,0	1,5
Ton, geringe Dichte	10,0	0,6
Ton, mittlere Dichte	10,0	1,3
Harter Ton	10,0	1,9

(Quelle: Landschaftswasserbau und Flussmorphologie, Honsowitz)

Die Gleichung zur Bestimmung der mittleren kritischen Geschwindigkeit  $v_{m,cr}$  für kohäsive Sedimente lautet:

$$v_{m,cr} = \lg \left( \frac{8,8h}{d_{ch}} \right) \sqrt{\frac{0,4}{\rho_w} [(\rho_F - \rho_w)g \cdot d_{ch} + 0,021 \cdot C_0]} \quad [\text{m/s}]$$

mit

h Wassertiefe [m]

$d_{ch}$  Charakteristischer Korndurchmesser [m]

$\rho_F$  Dichte des Feststoffes [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_w$  Dichte des Wassers [ $\text{kg/m}^3$ ]

$C_0$  Kohäsion [ $\text{N/m}^2$ ]

#### 2.2.4.5 Algenbewuchs

In Fließgewässern mit sandiger Sohle und mäßiger Verunreinigung kann sich durch den Algenbewuchs auf der Gewässersohle ein dünner, hautartiger Film, ähnlich einer Sielhaut, ausbilden. Dieser Film glättet die Sohlenoberfläche, erhöht den Verbund der einzelnen Partikel und trägt damit zur Stabilisierung der Sohle bei. Ähnliche Stabilisierungseffekte sind bei Kolmationsvorgängen an der Gewässersohle zu erwarten.

#### 2.2.5 Geschiebetransportformeln

Die Entwicklung allgemein gültiger Geschiebetransportformeln ist seit Jahrzehnten ein Forschungsschwerpunkt der Hydromechanik. Aus theoretischen (eindimensionalen) Betrachtungen über den Gleichgewichtszustand zwischen den Schubspannungen an der Gewässersohle resultieren zahlreiche Formeln. Die sich aus der Dreidimensionalität der Strömung ergebenden Effekte werden in den Formeln jedoch nicht berücksichtigt, sodass die Genauigkeit sehr eingeschränkt ist. In dieser Ausarbeitung sollen nur die Gleichungen von Einstein und Einstein & Brown sowie die Formel von Meyer-Peter & Müller näher erläutert werden, da sie in Mitteleuropa die in der Praxis vorkommenden Anwendungsbereiche weitgehend abdecken.

### 2.2.5.1 Formel von Einstein

Die Sedimentbewegung wird von Einstein als ein Wahrscheinlichkeitsproblem betrachtet, in das sowohl die Strömungsparameter als auch die sedimentspezifischen Parameter einbezogen werden. Aus Labormessungen mit verschiedenen Korngemischen wurden die dimensionslosen Kennzahlen Transportintensität und Strömungsintensität abgeleitet. Die Transportintensität  $\Phi$  ist durch

$$\Phi = \frac{m_G}{\rho_w \cdot \rho'} \cdot \left( \frac{1}{\rho'} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{1}{g \cdot d^3} \right)^{1/2}$$

mit

$m_G$  Geschiebetrieb [kg / ms]

gegeben und die Strömungsintensität  $\psi$  durch:

$$\psi = \frac{d \cdot \rho'}{h \cdot l} \quad [-]$$

In Bild 2.14 ist neben der reinen Geschiebefunktion nach Einstein auch eine später entwickelte Gesamttransportgleichung nach Einstein & Brown dargestellt.

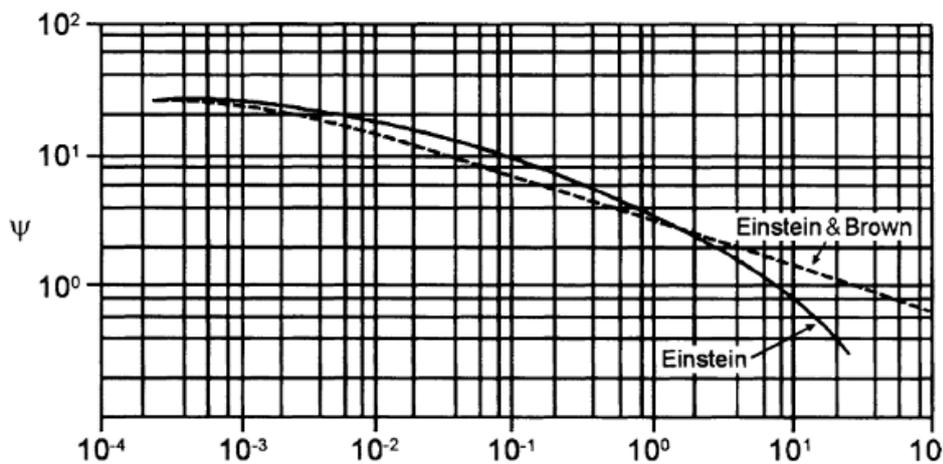


Bild 2.16 Geschiebefunktionen von Einstein und Einstein & Brown

### 2.2.5.2 Formel nach Meyer-Peter & Müller

Das Grundkonzept der Meyer-Peter & Müller-Formel ist der Vergleich von aktueller Schubspannung  $\tau$  und kritischer Schubspannung  $\tau_{cr}$ , bei der sich das Sohlenmaterial mit dem charakteristischen Korndurchmesser  $d_{ch}$  in Bewegung setzt. Die Gleichung lautet:

$$m_G = \frac{8}{g} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_F - \rho_w} \cdot \sqrt{\frac{1}{r_w}} \cdot \frac{[\rho_w \cdot g \cdot l_r \cdot R_s - 0,047 \cdot (\rho_F - \rho_w) \cdot g \cdot d_{ch}]^{3/2}}{\tau \cdot \tau_{cr}} \quad [\text{kg} / \text{ms}]$$

mit

$m_G$  Geschiebetrieb [kg/ms]  
 $l_r$  Reibungsgefälle [-]  
 $d_{ch}$  charakteristischer Korndurchmesser [m]

$$l_r = \left( \frac{k_{Str}}{k_r} \right) \cdot l \quad [-]$$

$k_{Str}$  Beiwert nach Manning-Strickler [ $m^{1/3}/s$ ]  
 $k_r$  Koeffizient der Kornrauheit [ $m^{1/3}/s$ ]

$$k_r = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}} \quad [m^{1/3} / s]$$

und

$d_{90}$  Korndurchmesser beim 90 – Prozent – Durchgang [m]

$$R_s = h \cdot \frac{Q_s}{Q} \quad [m]$$

mit

$R_s$  hydraulischer Radius für den transportwirksamen Abflussanteil [m]

$Q_s$  transportwirksamer Abflussanteil [ $m^3/s$ ]

$Q$  Abfluss [ $m^3/s$ ]

Über den transportwirksamen Abflussanteil  $Q_s$  wird die an den Transportvorgängen beteiligte Querschnittsfläche berücksichtigt. Zur Festlegung dieses Anteiles wird die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt benötigt. Näherungsweise kann  $R_s \approx h (b/l_u)$  angenommen werden ( $l_u$ -benetzter Umfang). Bei breiten Gerinnen ( $b > 30 h$ ) kann anstelle von  $R_s$  die Wassertiefe  $h$  eingesetzt werden.

Berechnet man den Geschiebetrieb mit verschiedenen Transportformeln und vergleicht die Resultate, weichen die Ergebnisse in der Regel mehr oder weniger stark voneinander ab. Eine allgemein gültige Formel gibt es nicht. Ein Vergleich der verschiedenen Formeln ergab, dass bei der Auswahl insbesondere die entsprechenden Gültigkeitsgrenzen beachtet werden müssen. Die Einstein & Brown-Formel ist z. B. beim Vorhandensein von feinem Sohlenmaterial besonders geeignet, während die Meyer-Peter & Müller-Formel den Bereich der Sand- und Kiessohlen abdeckt. [5]



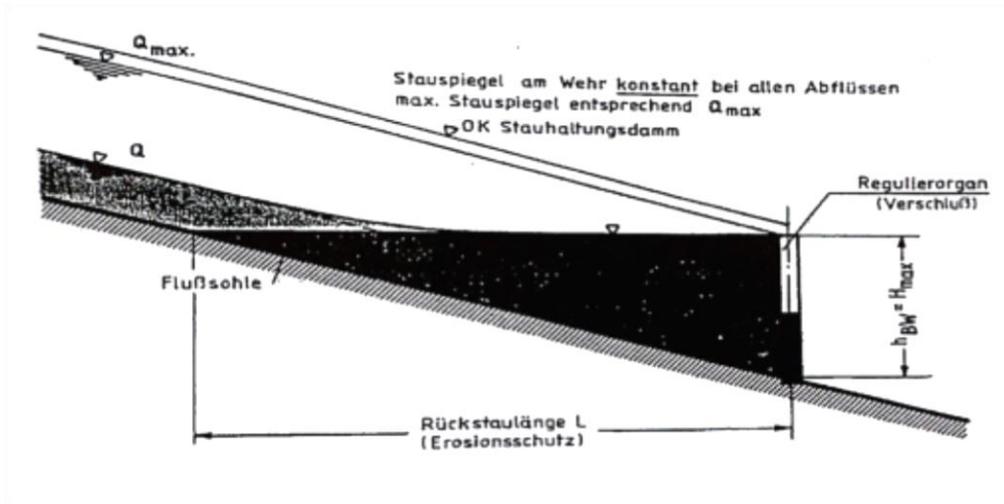
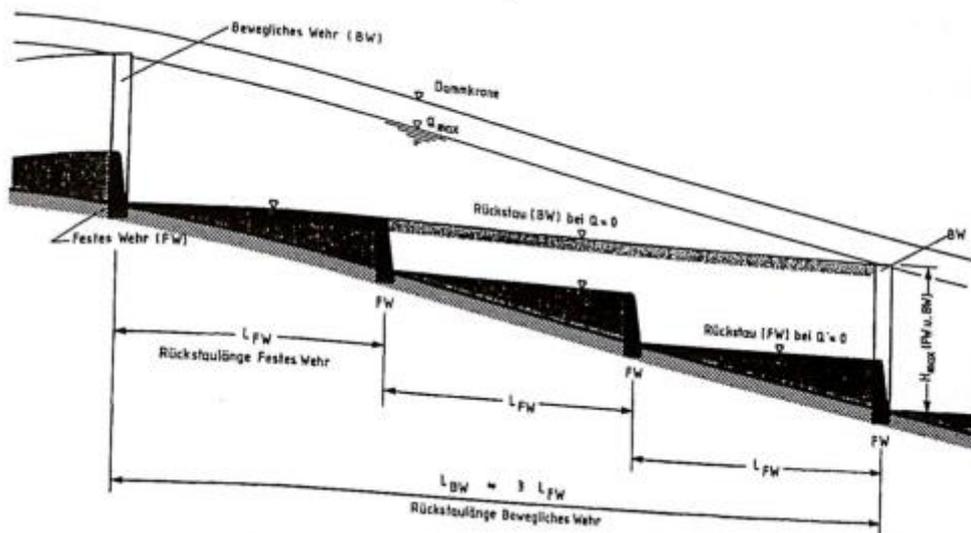


Bild 3. 2 Bewegliches Wehr (Quelle: Dissertation – Zach)

Obwohl bewegliche Wehre größere Investitionskosten erfordern, sind sie meistens zu bevorzugen, da sie die Möglichkeit einer Regulierung des Wasserspiegels in Abhängigkeit vom Wasserzufluss anbieten, d.h. bei gleicher Wehrhöhe eine größere Reichweite besitzen (siehe Bild 3.3).



BW....bewegliches Wehr  
FW....festes Wehr

Bild 3. 3 Vergleich der Wehrtypen (Quelle: Dissertation – Zach)

Bei dieser Methode, ist ein lückenloser Ausbau, bei welchem die Stauwurzel des stromab gelegenen Wehres bis zum Fußpunkt der Oberliegerwehrranlage reicht nur selten umzusetzen. Deshalb bildet sich eine kurze, begrenzte, freie Fließstrecke direkt an das Wehr anschließend aus (Bild 3.4.), in der die Erosionstendenz erhalten bleibt und der weiter stabilisiert werden muss. [6]

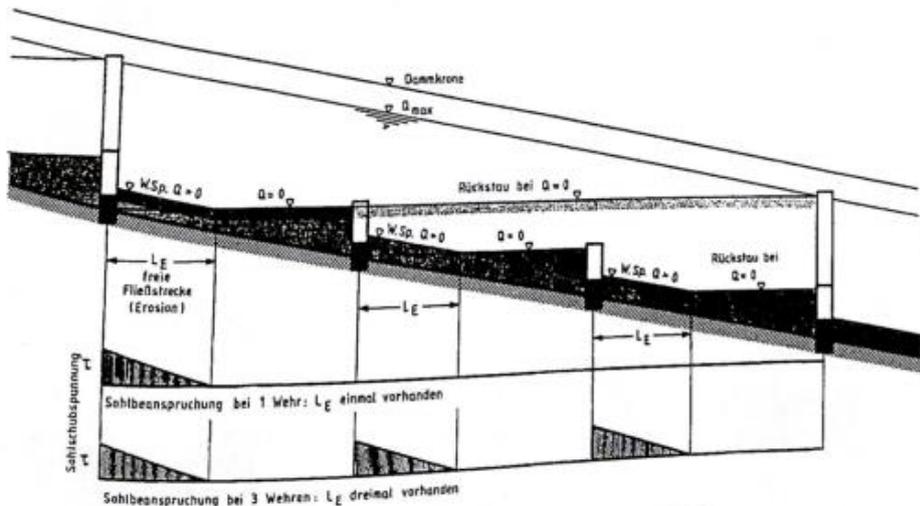


Bild 3. 4 Erosionsstrecken bei Wehren (Quelle: Dissertation – Zach)

Je größer die Anzahl der Wehranlagen ist, desto mehr Erosionsstrecken ergeben sich bei nicht lückenlosem Flussbau zwischen den Wehranlagen. Daher ist es in Bezug auf die Erosion vorteilhafter weniger Wehranlagen mit größerer Stauhöhe zu errichten.

### 3.1.1.2 Wasserkraftwerke

Falls die Entscheidung fällt eine Stauanlage zu errichten, erfolgt dies heute meistens in Form von konventionellen Mehrzweckanlagen, wo neben dem Wehr ein Kraftwerk situiert wird und damit verbundene zusätzliche Nutzungen gezogen werden können:

- Erhalt und Ausbau der Wasserkraftnutzung,
- Verbesserung des Hochwasserschutzes,
- Verhinderung weiterer Eintiefungen der Gewässersohle,
- Sicherung des Schiffverkehrs,
- Verbesserung der Naherholungsfunktion.



*Bild 3. 5 Ansicht – Kraftwerk Freudenau (Quelle: Imrl.lu)*

Hinsichtlich des Zieles die Erosion zu reduzieren besteht der hauptsächliche Grund der Errichtung eines Wasserkraftwerkes in der dadurch zu erreichenden Verminderung der Fließgeschwindigkeit. Zusätzlich gelingt es dadurch auch die Fahrwassertiefe für die Schifffahrt zu vergrößern.

### *3.1.1.3 Fließgewässerkraftwerke*

Bei Fließgewässerkraftwerken werden bekannte wasserbauliche Elemente so angeordnet und betrieben, dass ungünstige Einflüsse auf die Gewässerökologie weitestgehend reduziert werden. Dies wird durch folgende Merkmale erreicht:

- **Niedrige Fallhöhe und hohe Fließgeschwindigkeiten:**  
Kleine Fallhöhen, die sich aus dem Wasserspiegelunterschied von zur Stabilisierung verwendeten Querbauwerken wie Sohlgleiten ergeben, können als energiewirtschaftliche Instrumente genutzt werden. Vor diesen Querbauwerken kann sich aber die Sohle zufolge von Simendation im Oberwasser anheben, wodurch sich niedrigere Fließtiefen in diesem Gewässerbereich einstellen. Daraus ergeben sich erhöhte technische Anforderungen an den Kraftwerksbetrieb (u. U. Probleme bei der Anströmung) und das Geschiebemanagement. Die niedrigen Fließtiefen führen zu vergleichsweise höheren Fließgeschwindigkeiten, wodurch der Fließgewässercharakter gefördert und Kolmationseffekte an der Gewässersohle verhindert werden.

- Dynamik der Wasserspiegellagen:  
Im Bereich des Fließgewässerkraftwerkes variiert der Oberwasserspiegel in Abhängigkeit von Abflusses steht. Dadurch kann eine weitgehend naturnahe Variabilität der Wasserspiegellagen im Oberwasserbereich kann damit erreicht werden. (Bild 3.6)

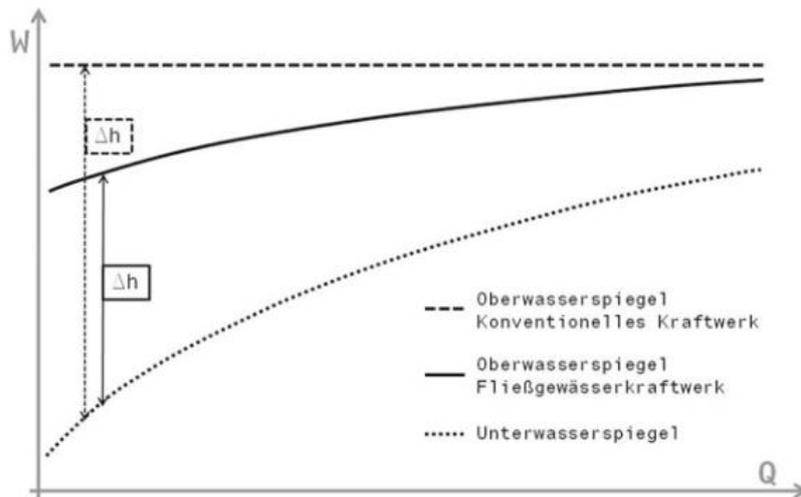


Bild 3. 6 Konzept des Fließgewässerkraftwerkes am Beispiel der Wasserstand-Abfluss- Beziehung (Quelle: Zeitschrift WasserWirtschaft 8/2011)

- Lange Zwischenstrecken:  
Die Strecken, die zwischen den Standorten der Fließgewässerkraftwerke liegen und wo ein deutlich höheres Energieliniengefälle vorhanden ist, verbleiben unbeeinflusst und sollten möglichst lange sein.

Die konkreten hydraulischen und sedimentologischen Situationsanforderungen sind von gewässerökologischen Experten vorzugeben. Gegenüber einer konventionellen Wasserkraftanlage (z. B. Stützkraftstufe) ergeben sich eine geringere nutzbare Fallhöhe und damit in der Regel eine signifikant geringere Effektivität in Hinblick auf die Erzeugung der Energie. Durch verschiedene Anforderungen (Verbesserung der Energiegewinnung, Hochwasserschutz, Sohlenstabilisierung) kann es notwendig werden, die Wasserstand-Abfluss-Beziehungen in Teilbereichen anzupassen. Hierdurch kann die Kraftwerksleistung deutlich erhöht werden. Die Einflüsse auf die Ökologie sind auf alle Fälle immer zu bewerten. [7]

Das Konzept der Fließgewässerkraftwerks kombiniert die notwendigen flussbaulichen Stabilisierungsmaßnahmen mit mit einer energetischen Nutzung. Es hat die Eigenschaften eines niedrigen Querbauwerkes wie z.B. Sohlgleiten (siehe 3.1.2.2). Gemäß der Wasserrahmenrichtlinie ist sowohl eine Verbesserung des morphologischen als auch des gewässerökologischen Zustand von Flussstrecken anzustreben. Wasserkraftnutzung mit diesen Zielen zu verbinden ist oft sehr schwere, aber die notwendige Stärkung erneuerbarer Energien ist jedoch unbestritten. Deshalb ist es oft erforderlich zu versuchen, auch an ökologisch sehr sensiblen Flussstrecken angepasste Wasserkraftnutzungen zu ermöglichen.

### 3.1.2 Sohlenbauwerke

Nach DIN 19661, Teil 2 sind Sohlenbauwerke in zwei wesentlichen Gruppen geteilt (Bild 3.7).

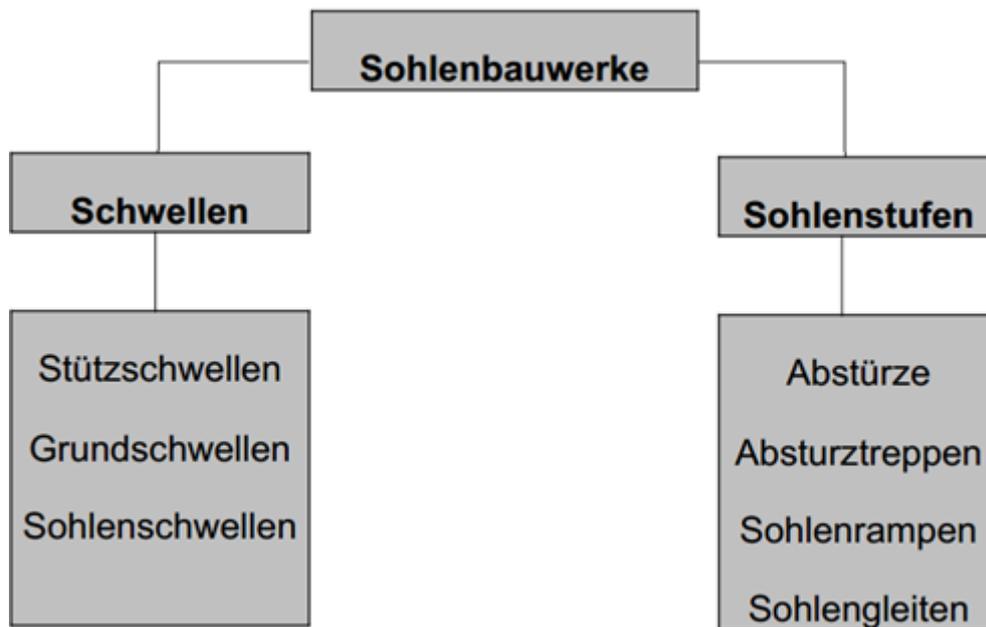


Bild 3. 7 Sohlenbauwerke

Diese Bauwerke können auch mittels naturnaher Baumaterialien hergestellt werden, sie zählen aber trotzdem zu den bautechnischen Maßnahmen. Sie sind quer zur Strömungsrichtung eines Flusses verlaufende Regelbauwerke, die seine Sohle stabilisieren und dadurch die Tiefenerosion vermindern.

#### 3.1.2.1 Schwellen

- Stützwellen

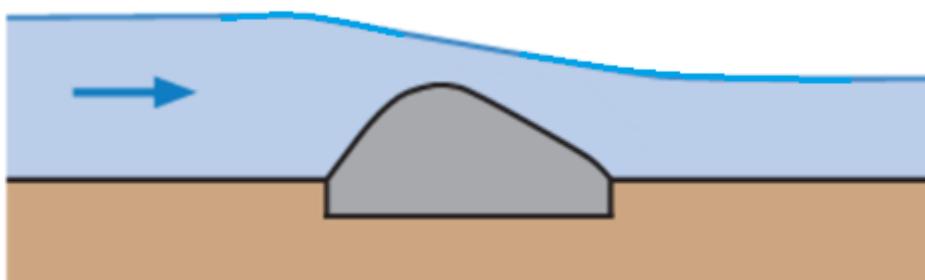


Bild 3. 8 Skizze – Stützwelle

Stützwellen sind Schwellen, die über die Sohle des Gewässers hinausragen und so einen Aufstau bewirken (Bild 3.8). Durch die Anhebung der Wasserspiegellage im Oberwasser wird das Energieliniengefälle verringert, was zu einer Reduktion der Fließgeschwindigkeit und somit auch der Schleppspannung führt. Durch die Konstruktion so einer Schwelle fließt das Wasser wie bei den überströmten Wehren über die Krone und es kann bei allen Abflüssen, in Abhängigkeit vom Unterwasserspiegel, zu einem Fließwechsel kommen. In der Regel ist daher für die Energieumwandlung meist ein Tosbecken erforderlich. Da sie in ihrer hydraulischen Wirksamkeit Abstürzen oder festen Wehren gleichen, werden Stützwellen auch als Stützwehre bezeichnet.

Aufgrund der verminderten Schleppspannung können Verlandungen des Stauraumes die Folge sein. Werden keine Maßnahmen dagegen ergriffen, entwickeln sich Stützswellen schließlich zu Sohlstufen und wirken wie Abstürze. Bei Laufverkürzungen können Stützswellen auch der Gefällekonzentration dienen.



Bild 3. 9 Stützschwelle in der Natur (wikipedia.org, Zugriff Dezember 2014)

- Grundswellen

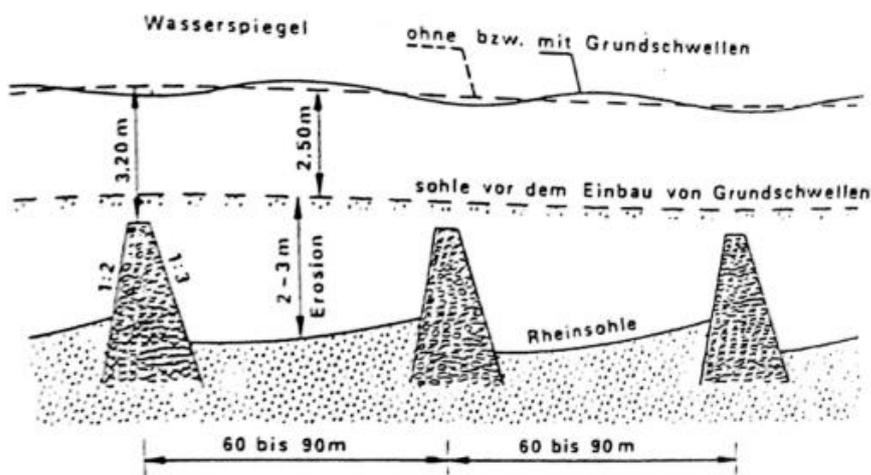


Bild 3. 10 Grundswellen – Skizze 10-fach überhöht. (Quelle: Dissertation - Stiefelmeyer)

Die Grundswellen sind Schwellen, die zwar auch über die Gewässersohle ragen, deren Höhe jedoch wesentlich geringer ist als jene von Stützswellen wodurch sie keinen Fließwechsel erzeugen (DIN 4045). Sie können die Widerstandsfähigkeit der Sohle erhöhen und die Sohlen- und Wasserspiegelabsenkung unterhalb einer Staustufe verhindern. Eine Untersuchung an der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe (1974) stimmt den vorhergesagten Fakten zu. Es wird aber auch gezeigt, dass stromabwärts der Grundswellen Kolke bis 3m möglich sind (Bild 3.10), bevor ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. D.h., wie bei den Wehren, könnten sich zwischen den Schwellen Erosionsprobleme ergeben, wo dann mittels anderer Maßnahmen weiter stabilisiert werden muss. Die Grundswellen sind auch hydraulisch wirksam und bewirken eine Erhöhung des Niedrigwassers.

- Sohlenschwellen

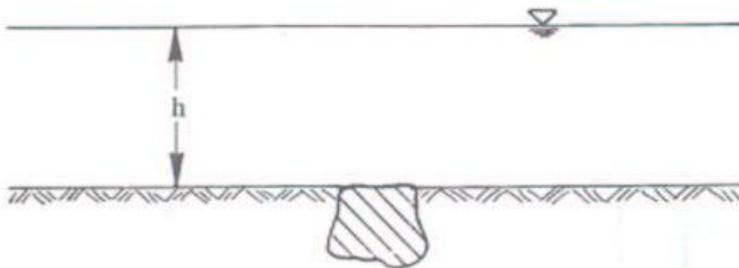


Bild 3. 11 Sohlschwelle (Quelle: de.wikipedia.org)

Sohlenschwellen sind Schwellen, die nicht über die Sohle hinausragen, sondern sohlengleich im Flussbett eingebaut werden (Bild 3.11). Sie wirken lediglich als Sohlenhaltepunkte, um so das Eintiefen zu verhindern. Bei auftretender Erosion können nach einer geraumen Zeit aus Sohlenschwellen Grundschwellen entstehen. Sie haben, solange sie sohlbündig und ohne Nachkolk sind, nur einen sehr geringen Einfluss auf die Hydraulik des Gewässers. In der Praxis werden Sohlenschwellen heute meistens nicht aus Beton, sondern mit groben Steinen errichtet, weshalb sie teilweise auch zu den flussbaulichen Maßnahmen gezählt werden.

### 3.1.2.2 Sohlenstufen

Sohlenstufen sind Querbauwerke, die einen Höhenunterschied in der Gewässersohle überwinden. Dabei wird das Sohlenlängsgefälle an dieser Stelle zusammengefasst, sodass oberhalb und teilweise unterhalb dieses Sohlenbauwerkes das Gefälle verringert wird. Dabei soll das Gefälle so gewählt werden, dass die Sohle im Gleichgewichtszustand verbleibt. Sohlenstufen dienen auch zur:

- Stabilisierung der Gewässersohle zur Vermeidung von Erosion
- Anhebung der Gewässersohle bei bereits eingetieften Gewässern
- Erhöhung der Wassertiefe.

- Abstürze



Bild 3. 12 Absturz (DIN 19661-2)

Abstürze sind die in Fließrichtung kürzesten Sohlstufen, da die Gefällekonzentration an einer Stelle lokal auftritt. Sie bestehen aus einer lotrechten oder einer steil geneigten Absturzwand. Sie werden meistens in rechteckige, trapezförmige oder dreieckige Form ausgeführt.

- Absturztrepfen

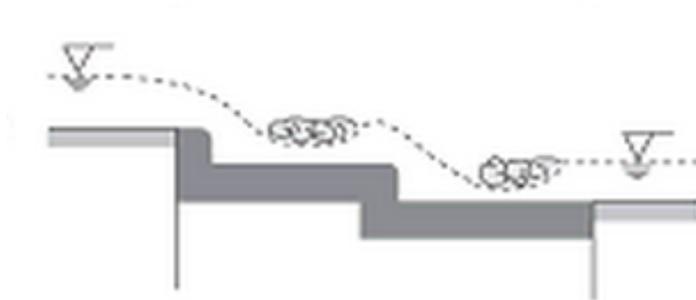


Bild 3. 13 Absturztrepfen (DIN 19661-2)

Absturztrepfen, auch Kaskaden genannt, sind Bauwerke, die einen Höhenunterschied mit Hilfe mehrerer einzelner Abstürze überwinden. Bei diesen Sohlenbauwerken muss die Energielinie soweit verflacht werden, dass der Geschiebetrieb gegen Null geht. Dieser Anspruch erfordert oft einen Abschluss mit einem Tosbecken.

- Sohlenrampen und Sohlgleiten

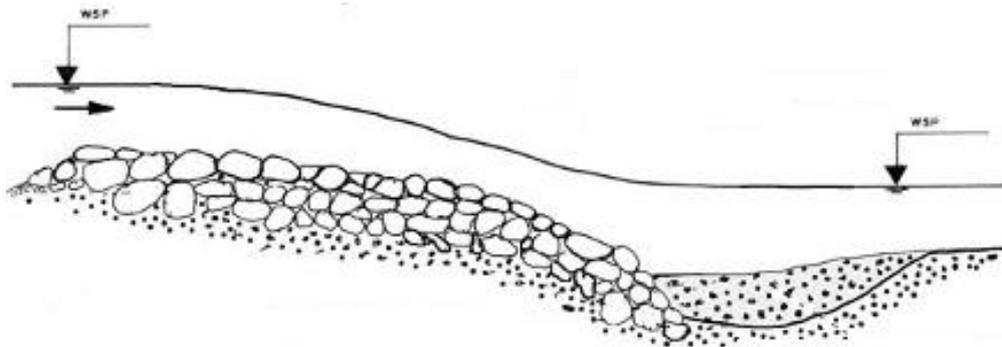


Bild 3. 14 Sohlgleite

Bei Sohlenrampen und Sohlgleiten wird der Höhenunterschied in der Gewässersohle mit einer flachen Neigung überwunden. Diese Neigung ist der Unterschied zwischen den Rampen und Gleiten (bei Rampen 1:3÷1:10, bei Gleiten 1:20÷1:30). Diese Bauwerke können betoniert werden, in der Praxis werden sie aber fast immer mit Steinen ausgeführt.

### 3.2 Flussbauliche Maßnahmen

Die flussbaulichen Maßnahmen sind ein umweltfreundlicherer Lösungsweg zur Sohlstabilisierung. Oft stellen sie auch die kostengünstigere Variante dar, weshalb sie heutzutage immer mehr in diesem Anwendungsbereich ausgeführt werden.

#### 3.2.1 Buhnen

Buhnen sind flussbauliche Regulierungsbauwerke, die vom Ufer quer zur Fließrichtung in den Fluss eingebaut werden. So kann der Abflussquerschnitt verringert und die Fließgeschwindigkeit im verbleibenden Restquerschnitt erhöht werden.



*Bild 3. 15 Buhnenpaare und linksseitige Buhnen an der Ruhr südlich von Bochum. (Quelle: de.wikipedia.org, Januar 2015)*

Durch die Schiffbarmachung von Flüssen begann Mitte des 19. Jahrhunderts der systematische Buhnenbau bei vielen großen Flüssen in Europa. Ziel war es eine ganzjährige Schifffahrt zu ermöglichen.

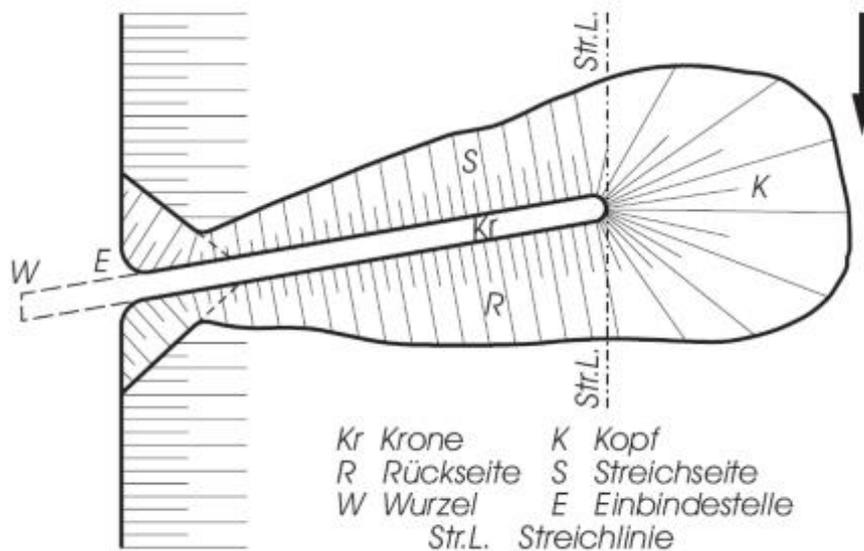


Bild 3. 16 Bezeichnung einer Buhne (Quelle: Buhnen, Krouzecky 2004)

Die wichtigsten Funktionen der Buhnen sind der Ufer- und der Deichschutz sowie die Uferstabilisierung. „Buhnen vermögen, richtig angeordnet, den Abbruch der Ufer zu hemmen und, wenn versenkt, die Ausnagung der Sohle zu beschränken.“ [Kreuter 1907]. Bei der Sanierung von Flüssen kann nach der Entfernung der seitlichen Ufersicherung mit Hilfe von Buhnen die Ufererosion begrenzt werden.

Am häufigsten aber kommen Buhnen an Flüssen als Regulierungsbauwerke zur Anwendung. Mit Hilfe der Buhnen lässt sich der Flussquerschnitt auf eine gewünschte Breite reduzieren.

Auch um nutzbare Fläche zu gewinnen, werden Buhnen eingebaut. Innerhalb der Buhnenfelder wird durch die Zirkulationsströmung das vom Fluss mitgeführte Geschiebe abgelagert. Danach werden die Buhnen so optimiert, dass es in diesen Feldern zu einer Verlandung kommt.

Signifikant für die vorliegende Arbeit ist die Funktion der Buhnen die Sohleintiefung zu verhindern. Beim Bauen der Buhnen wird der Abflussquerschnitt vermindert, und dadurch erhöht sich die Schleppspannung in Restquerschnitt. So ist es möglich, die gewünschte Fahrinne für die Schifffahrt zwischen den Buhnenkörpern zu erreichen und bei Hochwasser die Wasserspiegel abzusenken. Trotzdem ist heutzutage genau diese Sohleintiefung an ökologisch sensiblen Standorten meistens unerwünscht.

In letzter Zeit ergibt sich die Tendenz, vor allem an der deutschen und österreichischen Donau, für eine Kombination von Buhnenfeldern und sohlstabilisierenden Maßnahmen. Der wesentliche Vorteil dieser Verwendung von Buhnen liegt darin, dass sich bei gleicher Regelungsbreite aufgrund der Interaktionswirkung zwischen Buhnenfeld und Hauptstrom teilweise erheblich höhere Wasserspiegelanstiege als mit Leitwerken erzielen lassen. Diese Kombination bringt eine Erhöhung des Wasserspiegels bei Niederwasserabfluss ohne gleichzeitige Eintiefung der Flusssohle, stellt aber einige noch ungeklärte Fragen vor allem nach der Auswirkung auf die Schifffahrt, die Ökologie und die Wirtschaftlichkeit. [8]

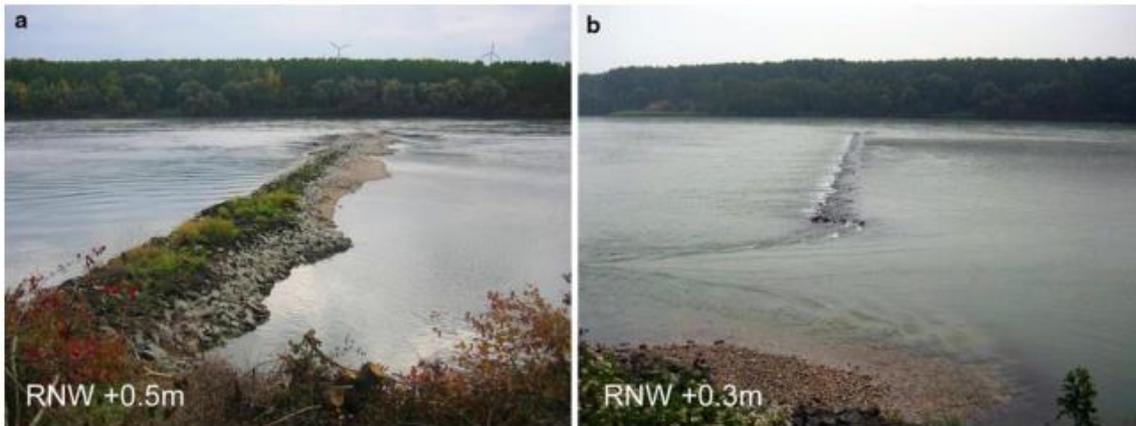


Bild 3. 17 a. Orthogonale Buhne auf Mittelwasserniveau (durch Sohleintiefung), vor Optimierung; b. Neue, deklinante auf Niederwasser plus 30 cm abgesenkte, nicht vollständig ans Ufer angebundene Buhne. (Quelle: via Donau)

Buhnen können prinzipiell deklinant, orthogonal und inklinant mit jeweils unterschiedlicher Wirkung auf die Sedimentation ausgebaut werden.

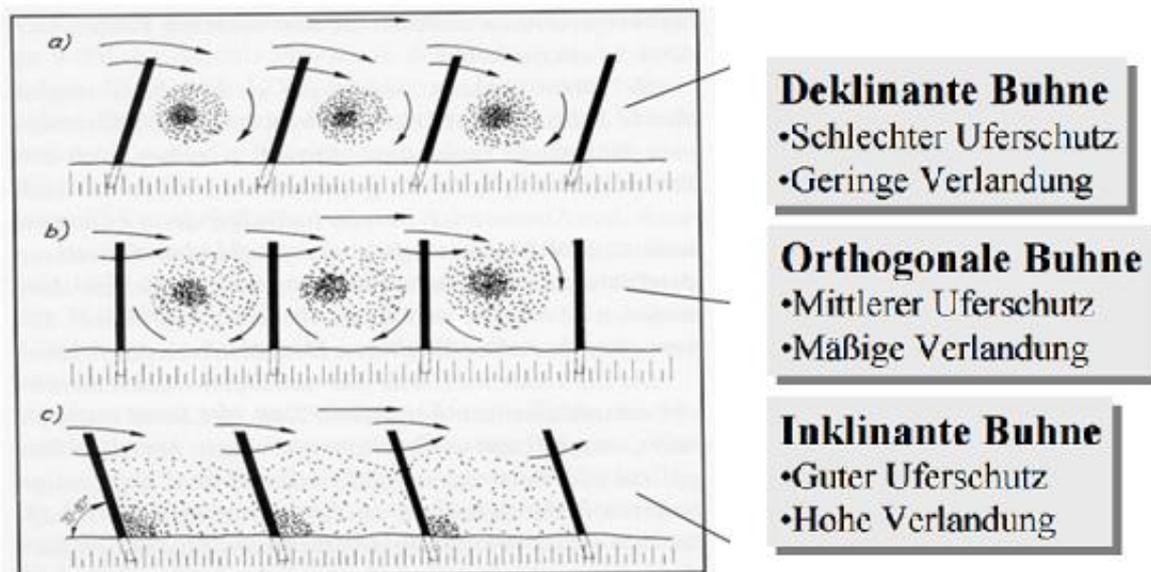


Bild 3. 18 Buhnenwirkung – deklinant, orthogonal und inklinant (Quelle: baw.de, Januar 2015)

Es gibt auch verschiedene Bauweisen von Buhnen, aber alle werden wegen wirtschaftlicher und ökologischer Gründe aus örtlich leicht zu beschaffenden, geeigneten Materialien gebaut. Diese genauen Gegebenheiten verursachen die verschiedenartigen Bauweisen:

- Steinbuhnen – Können hergestellt werden aus Steinschüttung (Blocksteine), aus einem Kieskern mit einer Einschüttung oder mit einer Pflasterung als Abdeckung.

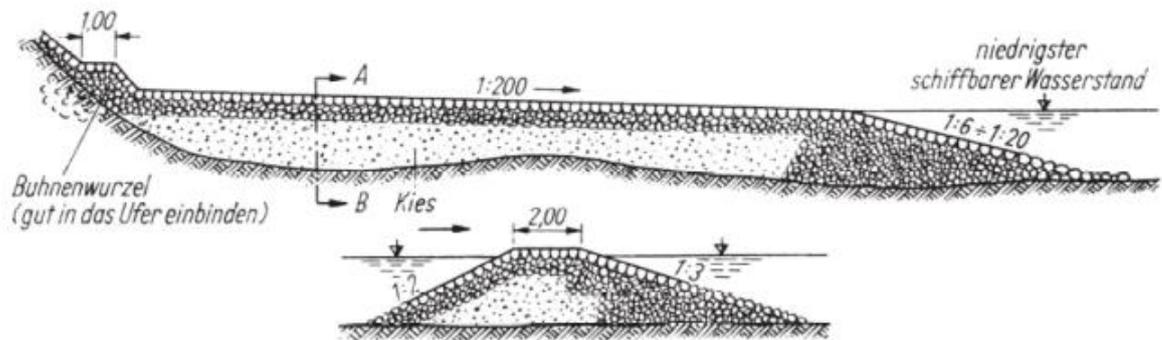


Bild 3. 19 Steinbuhne (Quelle: Buhnen, Krouzecky 2004)

- Packwerksbuhnen – Bei den Packwerksbuhnen besteht der Buhnenrumpf großteils aus schweren Packwerkslagen.

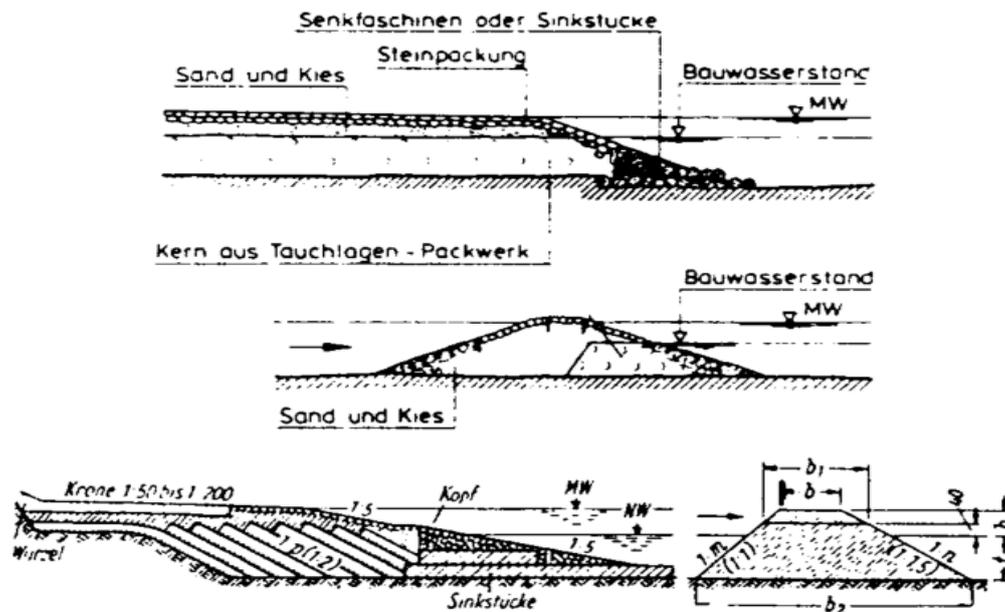


Bild 3. 20 Packwerksbuhne (Quelle: Gewässerplanung und konstruktiver Wasserbau SS 2003)

- Buhnen in gemischter Bauweise – Bestehen aus Walzen, Packwerk, Steinen, Kies und Pflasterung.

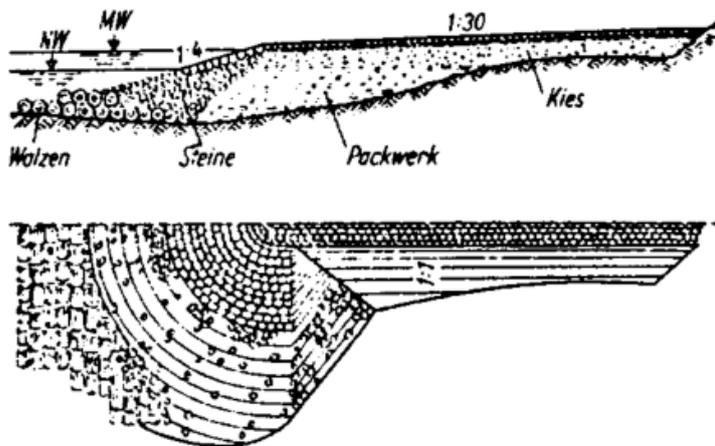


Bild 3. 21 Buhne in gemischter Bauweise (Quelle: Gewässerplanung und konstruktiver Wasserbau SS 2003)

- Drahtbuhnen – Schützen die Hauptbuhnen

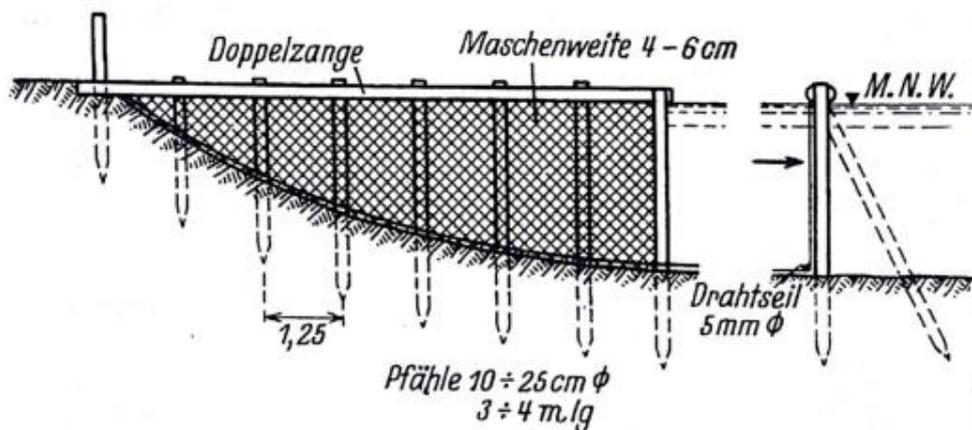


Bild 3. 22 Drahtbuhne (Quelle: Buhnen, Krouzecky 2004)

### 3.2.2 Laufverlängerung

Bei dieser Maßnahme wird das Wasser in ein neues, längeres Fließbett geleitet, welches z.B. durch die Ausbildung von Mäandern entsteht (Bild 3.24). Die Hauptaufgabe der Laufverlängerung ist es, das Energieliniengefälle zu reduzieren. Daraus folgt eine Verringerung der Fließgeschwindigkeit, was der Tiefenerosion entgegen wirkt. Wenn bei der Verlängerung eine weitere Anhebung der Wassertiefe notwendig ist, kann dies durch die Anordnung einer Sohlgleite oder Schwelle im Unterwasser der Verlängerung erreicht werden.

Die Methode der Laufverlängerung ist aus heutiger Sicht in der Praxis meistens bei kleineren Flüssen, bzw. in kleineren Flussabschnitte möglich, da oft die umgebende Landschaft anthropogen genutzt wird.

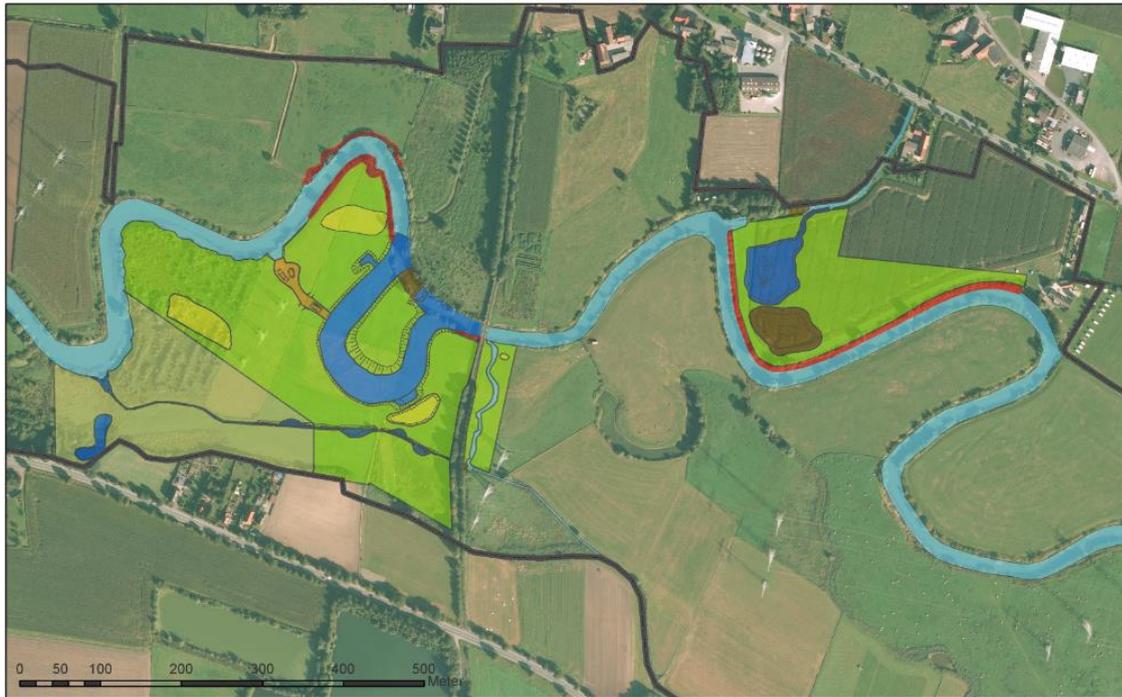


Bild 3. 23 Laufverlängerung – Situation bei der Lippe (Quelle: hamm.de)



Bild 3. 24 a. Mäanderwiederanbindung an der Raab, Öffnung des Einlaufbereiches, b. Sedimentationsbereiche aus Modellversuch, dunkle Bereiche. (Quelle: Maßnahmen für einen modernen Flussbau betreffend Sohlstabilisierung und Flussrückbau, Springer – Verlag 2012)

### 3.2.3 Sohlabflachung

Grundsätzlich stimmt diese Methode mit der Laufverlängerung überein. Bei der Sohlabflachung wird durch Baggerungen das Sohlgefälle reduziert und die daraus folgende Verringerung der Fließgeschwindigkeit und der Schubspannungen realisiert. Die Abflachung verursacht eine Abnahme des Geschiebetransportvermögens und damit klingen die Eintiefungsraten allmählich ab. Während die Maßnahme der Laufverlängerung manchmal auch bei großen Flüssen angewendet werden kann, ist die Sohlabflachung nur bei kleinen möglich.



*Bild 3. 25 Abgeflachte Sohle (Quelle: wikipedia.org)*

### 3.2.4 Sohlrollierung bzw. Sohlpanzerung

Diese Technologie besteht aus einer Grobmaterialdeckschicht, wie z.B. Felsmaterial aus Steinbrüchen. Bei Verwendung von Bruchsteinen müssen zuvor genaue Prognosen erstellt werden, sodass klar ist, ob diese Lösung wirtschaftlich und umweltfreundlich sein könnte, da bei vielen Flüssen keine Steinbrüchen unmittelbarer Nähe vorhanden sind.

Vor dem Steinbau muss die Fusssohle plangemäß vorbereitet werden und eine umfassende Kontrolle muss vor, während und nach dem Aufbau durchgeführt werden.

Der Unterschied zwischen Sohlrollierung und Sohlpanzerung liegt bei dem verwendeten Material. Bei der Panzerung wird eine Rollierung mit dem Mindestkorndurchmesser aufgebracht, der auch bei einem Hochwassereignis den Fließkräften widersteht und nicht weitertransportiert werden kann. Es handelt sich somit um eine bis zur höchsten Belastung starre Schutzschicht der Sohle.

Von einer Sohlrollierung spricht man, wenn auf die Flusssohle gröberes Deckmaterial aufgebracht wird, welches die Erosion reduziert, aber nicht immer vollkommen unterbindet (z.B. dynamische Sohlstabilisierung)



Bild 3. 26 Beispiel für eine Sohlpanzerung (Quelle: tirol.gv.at, Februar 2015)

Es gibt zwei Methoden der Anordnung der Sohlrollierung:

- Die Sohlrollierung wird auf die vorhandene Flusssohle aufgebracht, d.h. das Sohlniveau steigt mit der Dicke der Rollierungsschnitte.
- Die Sohlrollierung wird nach vorherigem Abgraben der Flusssohle eingebaut, sodass das Sohlniveau unverändert bleibt.

Bei beiden Möglichkeiten bestehen Nachteile. Bei der ersten Variante ergibt sich das Problem, dass durch die Anhebung der Wasserspiegel auch Uferaufhöhungen notwendig werden. Bei der zweiten Variante besteht neben den erhöhten Kosten auch der Nachteil, dass durch die Umgrabarbeiten sensible Schichten angeschnitten werden können.

Zusätzlich stellt eine Sohlpanzerung bzw. Sohlrollierung auch für die Schifffahrt ein erhöhtes Risiko dar. In diesem Fall ist zusätzlich zu berücksichtigen:

- Zur Verminderung von Schäden an den Schiffen muss der Abstand zwischen gepanzerter Sohle und Schiffsboden auf jeden Fall größer sein als zwischen der natürlichen Sohle und dem Schiffsboden,
- Durch die größere Einbaustärke ergibt sich ein größerer Materialbedarf
- Über eine Sohlstabilisierung mit Sohlpanzerung bzw. Sohlrollierung aus Rundkorn oder gebrochenem Material bei Flüssen mit dem Charakter der Donau im gegenständlichen Bereich gibt es keine sichere Erfahrungen
- Ein zuverlässiges Ankern kann durch eine Sohlpanzerung erschwert, möglicherweise sogar verhindert werden. [9]

### 3.2.5 Geschiebezugabe

Unter der Methode der Geschiebezugabe versteht man eine laufende Zugabe von Kies und Sand. Dadurch gelingt es die durch Erosion eintretende Eintiefungen zu verhindern bzw. zu kompensieren. Dies erfordert eine maschinelle Entnahme des Kieses und Sandes aus dem nahen Vorland, wo es ähnliche Körnungen gibt. Andernfalls müsste die gewünschte Kornzusammensetzung durch Sieben und Mischen an der Baustelle erreicht werden. Als Förder-, Transport- und Einbaugeräte kommen Bagger, Rohrleitungen, Transportbänder, Klappschuten und andere Mittel in Frage.

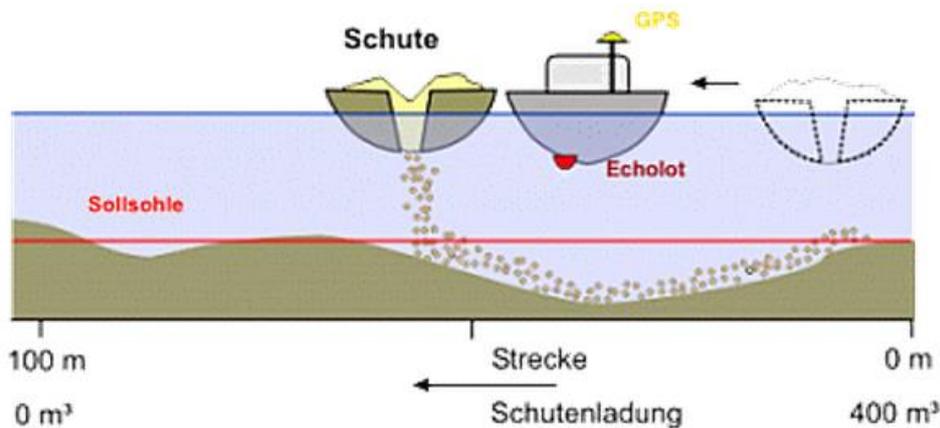


Bild 3. 27 Methode der Geschiebezugabe (Quelle: paelt.de, Februar 2015)

Der Kies kann jeweils unabhängig von der Wasserführung so lange kontinuierlich eingebaut werden, bis die alte Sohlenhöhe wieder erreicht ist. In Abhängigkeit von der Wasserführung wird die Strömung das abgelagerten Material aber weiterhin abtransportieren, wie es auch schon vor dem Ausbau von ihr bewegt wurde. Damit aber wird die Geschiebebilanz wieder ausgeglichen. Dies kann durch die Weiterführung der Kanalisierung nicht erreicht werden, da hierbei das Geschiebedefizit nicht behoben wird, so dass die Erosion unterhalb der jeweils letzten Staustufe zwangsweise neu einsetzen muss. Wenn mit Hilfe der kontinuierlich weiter durchzuführenden Geschiebezugabe die Stromsohle auf ihrer Ausgangshöhe gehalten wird, dann ist auch die Beibehaltung der ursprünglichen Wasserspiegellagen möglich.

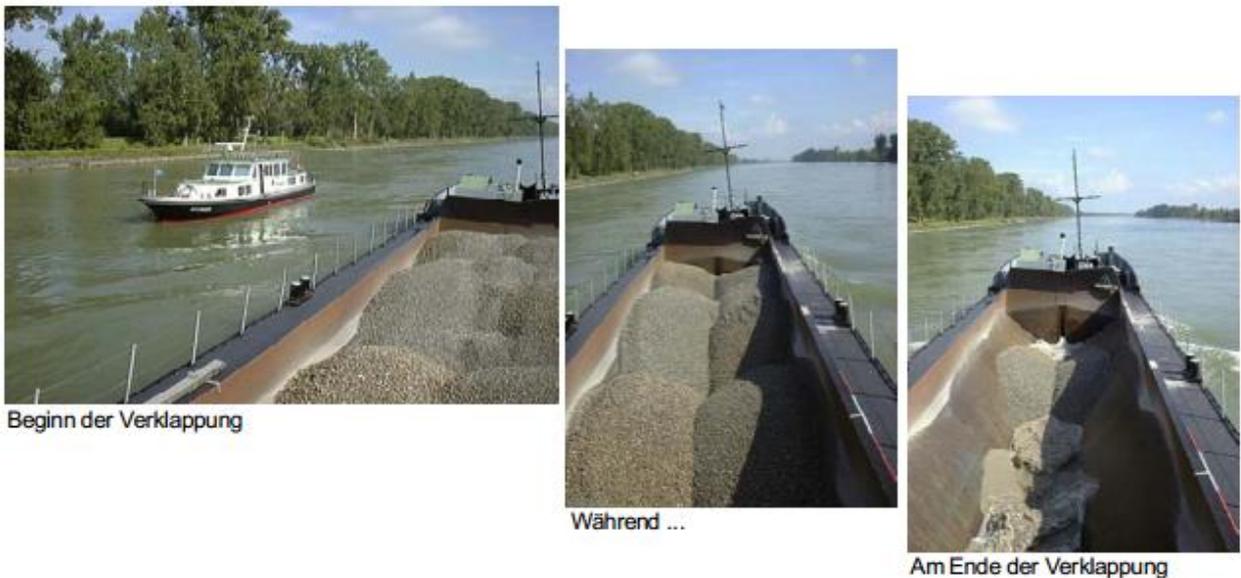


Bild 3. 28 Verlauf einer Geschiebezugabe (Quelle: baw.de, Februar 2015)

Die Geschiebezugabe verspricht folgende Vorteile:

- Die Geschiebezugabe verhindert die Sohlerosion
- Die Geschiebezugabe verändert die Grundwasserstände nicht und beeinflusst somit nicht die damit in Verbindung stehenden Nutzungen wie Trinkwasserentnahmen, Land- und Fortwirtschaft.
- Die Geschiebezugabe bewirkt keine Vergrößerung der Hochwassergefahr
- Die Geschiebezugabe beeinflusst die Ökologie nicht oder nur gering
- Die Geschiebezugabe ist mit einem sehr geringeren Risiko verbunden.

Die Nachteile sind, dass durch diese Methode die vollen ganzjährigen Schifffahrtstiefen dadurch nicht gewährleistet werden können und dass im Vergleich zu den Mehrzweckanlagen die Geschiebezugabe keine Voraussetzung für eine Wasserkraftgewinnung bietet. Weitere wesentliche Nachteile sind der notwendige große Verbrauch an Geschiebemenge und damit verbundene Belastung der Umwelt durch den Transport und die Gewinnung der dafür notwendigen großen Mengen an Material sowie die laufend anfallenden Kosten. Die Geschiebezugabe stellt somit keine nachhaltige Lösung dar.

### 3.2.6 Grobmaterialzugabe zur Deckschichtbildung

Eine andere Art der Sohlstabilitätserhöhung eines Flusses ist die Maßnahme der Grobkornzugabe oder, auch Grobmaterialzugabe zur Deckschichtbildung genannt. Dabei wird eine ausreichende Deckschicht durch der Zugabe von Grobmaterial ausgebildet. Bei dieser Methode wird der mittlere Korndurchmesser des natürliche Geschiebematerials durch eine Grobkornfraktionen vergrößert, sodass die gebildete Deckschichte in der Lage ist, den Hochwasserangriffen zu widerstehen (Bild 3.29). Die Grobkornzugabe erfolgt durch das Aufbringen einer Schichte gröberen Sohlmaterials auf die Stromsohle, wodurch das Sohlniveau um die Dicke der Einbringungsmenge angehoben wird.

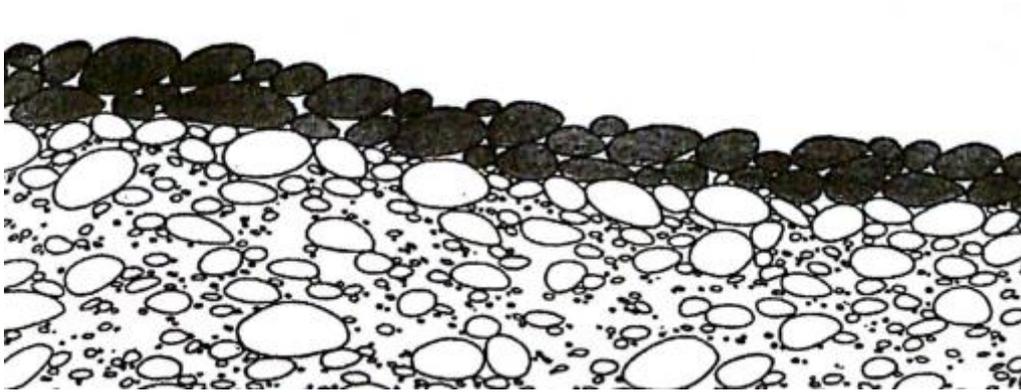


Bild 3. 29 Prinzipskizze einer künstlichen Deckschichtbildung

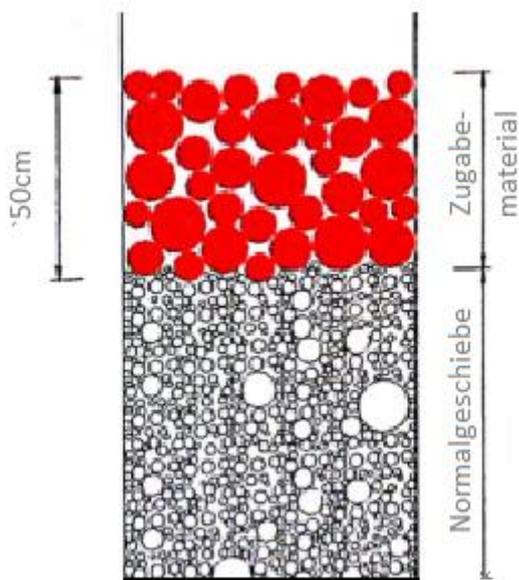


Bild 3. 30 Schematische Skizze – Grobkornzugabe

Unter Umständen kann es zu einer Durchmischung des ursprünglichen Sohlmaterials mit dem Zugabematerial kommen, wodurch sich eine „Mischdeckschicht“ ausbildet. Diese Mischdeckschicht wird so dimensioniert, dass ihr Widerstandsvermögen eine Erosion verhindert.

### 3.2.7 Querschnittsaufweitung

Flussaufweitungen sind in den letzten Jahren eine der wichtigsten Instrumente im naturnahen Wasserbau geworden. Generell lassen sich wasserbauliche und ökologische Aspekte dieser Methode unterscheiden. Die wesentlichen wasserbaulichen Aspekte sind zwei: die Erhöhung der Abflusskapazität und die Stabilisierung der Gerinnesohle. Einerseits bewirkt die Verbreiterung eine Vergrößerung des Abflussquerschnitts und damit eine lokale Erhöhung der Abflusskapazität des Gerinnes, und andererseits führt diese Verbreiterung zur Abnahme der Transportkapazität und somit zur Ablagerung von Geschiebe in der Flussaufweitung.

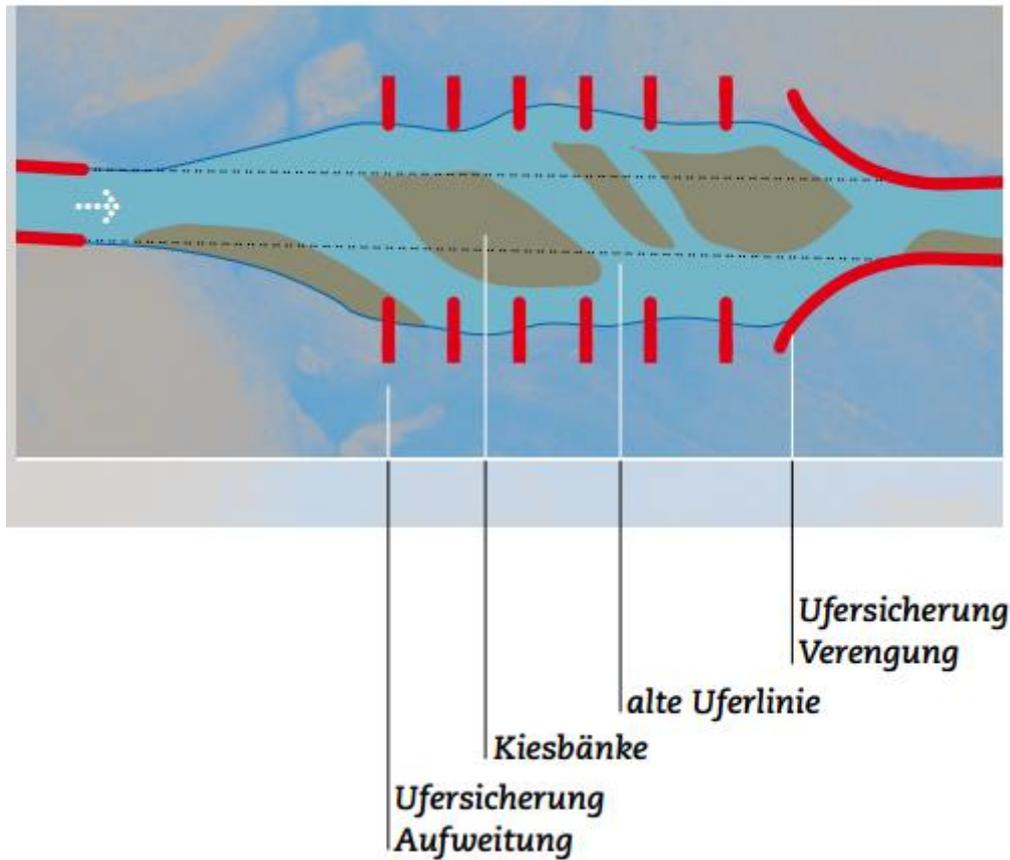


Bild 3. 31 Schema einer Flussaufweitung. (Quelle: kanderwasser.ch, März 2015)

Inwieweit Flussaufweitungen übergeordnete Auswirkungen eines Flusses beeinflussen, hängt im Wesentlichen vom Geschiebehalt des Flusses (Erosions- oder Gleichgewichtszustand) sowie der Art der Ausführung der Flussaufweitung ab.

Aus ökologischer Sicht ist die Erhöhung der Dynamik und der Strukturvielfalt des Gewässers sehr wichtig, welche stark von der Fließgewässerbite beeinflusst werden.

Es gibt vier Arten der Ausführung einer Flussaufweitung:

- Natürlich: Die Aufweitung ist das Ergebnis der Morpho- und Hydrodynamik des Flusses, d.h. die Aufweitung bildet sich durch seitliche Erosion des Ufers infolge eines natürlichen Prozesses von selbst.
- Eigendynamisch: Die alte Ufersicherung wird entfernt und durch Anreißen der Böschung oder durch Buhnen wird eine laterale Erosion innerhalb eines begrenzten Gebietes initiiert und gefördert. In der Regel werden Zonen definiert in denen sich der Fluss frei entfalten kann. Erreicht der Fluss diese Linien, so muss über das weitere Vorgehen zur Gewährleistung des Hochwasserschutzes entschieden werden.



Bild 3. 32 Eigendynamische Aufweitung durch Seitenerosion (Quelle: Chr. Herrmann, 2003)

- Gemischt: Der Fluss wird maschinell verbreitert (nicht bis auf die maximal zulässige Breite). Dieses Vorgehen gewährleistet, dass sofort ein aufgeweitetes Gerinne realisiert wird, obwohl noch ein gewisser Bereich der Eigendynamik überlassen wird.
- Maschinell: Der Fluss wird maschinell auf die projektierte Breite ausgebaut und das Ufer gegen weitere Erosionen gesichert.

## 4. Beispiele für Sohlstabilisierungen gegen Erosion

Im folgenden Kapitel werden drei schon durchgeführte Beispiele der Sohlstabilisierung insbesondere in Österreich beschrieben. Das ist nicht eine Vergleich der dargestellten Maßnahmen, sondern dient lediglich der Darstellung fertiger Projekte, die zur Verbesserung der flussmorphologischen Prozesse durchgeführt wurden.

### 4.1 Neue Donau

Die Neue Donau ist ein östlicher Seitenarm der Donau in Wien, verläuft auf einer Strecke von etwa 21 km parallel zum Strom durch das Wiener Stadtgebiet. Sie ist im Rahmen der Wiener Donauregulierung als Entlastungsgewässer für den Hochwasserschutz konzipiert.



*Bild 4. 1 Die Neue Donau im Bereich zwischen Kaisermühlen und Floridsdorf; links die Donau (Quelle: wikipedia.org, März 2015)*

1957 wurden mit den Planungen für einen verbesserten Hochwasserschutz begonnen. Durch das neue Bauwerk ist es möglich eine Hochwassermenge von bis zu  $14000 \text{ m}^3/\text{s}$  gefahrlos abzuführen, was dem Hochwasser des Jahres 1501 entspricht, dem größten bisher in Wien verzeichneten Hochwasser. Die Wassermenge würde sich dabei zu  $5200 \text{ m}^3/\text{s}$  auf die Neue Donau und zu  $8800 \text{ m}^3/\text{s}$  auf den Hauptstrom aufteilen. Die Gesamtkosten für die Errichtung betragen 4,5 Milliarden Schilling, zusammen mit dem zeitgleich errichteten rechten Donaudamm 7 Milliarden Schilling. Bei den Bauarbeiten wurden rund 30 Millionen Kubikmeter Erde bewegt.

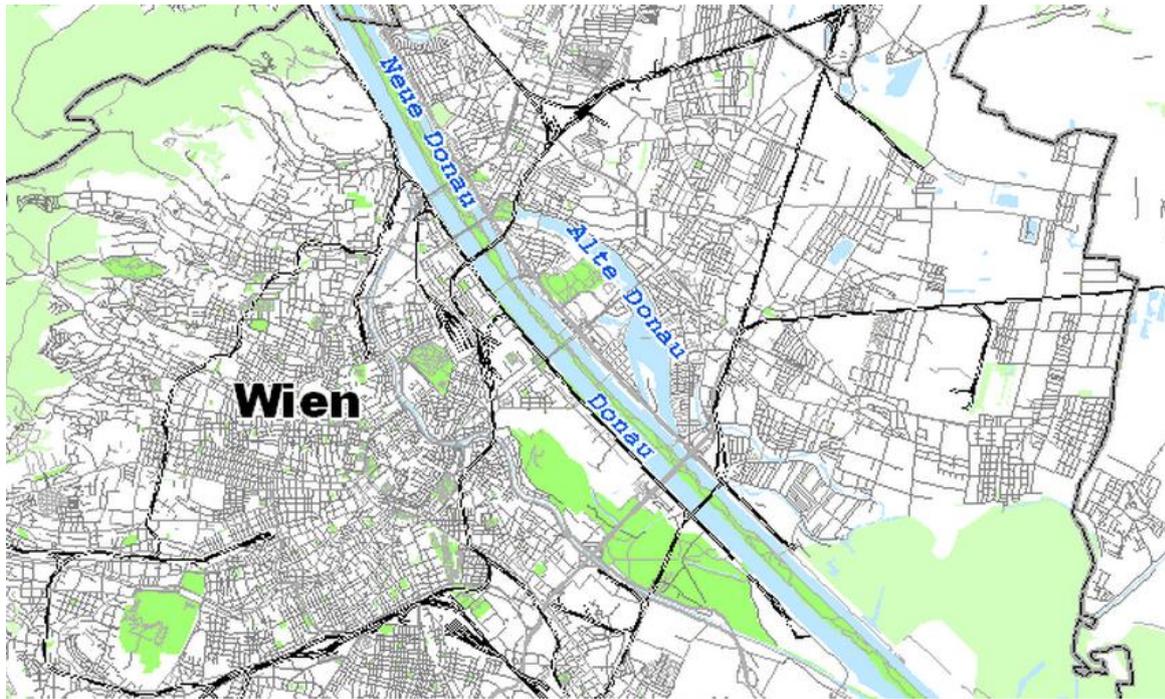


Bild 4. 2 Übersicht Donauraum Wien (Quelle: wikipedia.org, März 2015)

Ohne Belastung durch Schifffahrt wurde dieses Entlastungsgerinne für einen Maximaldurchfluss von  $5200 \text{ m}^3/\text{s}$  geplant. Die statische Sohlstabilität wird mit der Methode der Sohlrollierung (Sohlpanzerung) gewährleistet. Die Stärke und die Korngröße der Rollierung wurden durch die Verwendung der Geschiebeformel von Meyer-Peter bestimmt. Die Ergebnisse zeigen eine erforderliche Korngröße von  $d_{\text{MIN}} = 15 \text{ cm}$ . Wegen der schweren Einbaubedingungen unter Wasser wird die Stärke der Rollierung in dreifache Stärke des Minimalkornes (45 cm) genutzt. Aufgrund von Problemen mit der Materialbeschaffung erfolgte die Ausführung mit Größtkörnern bis 30 cm. Zusammenfassend ist die Sohlrollierung in der Neuen Donau 45 cm stark aus Steinmaterial mit Korndurchmesser von 15 – 30 cm.

Dieser Material wurde durch ein Spezialponton, eine Schwimmbrücke und LKW-Kippern an der Sohle eingebracht (Bild 4.3).

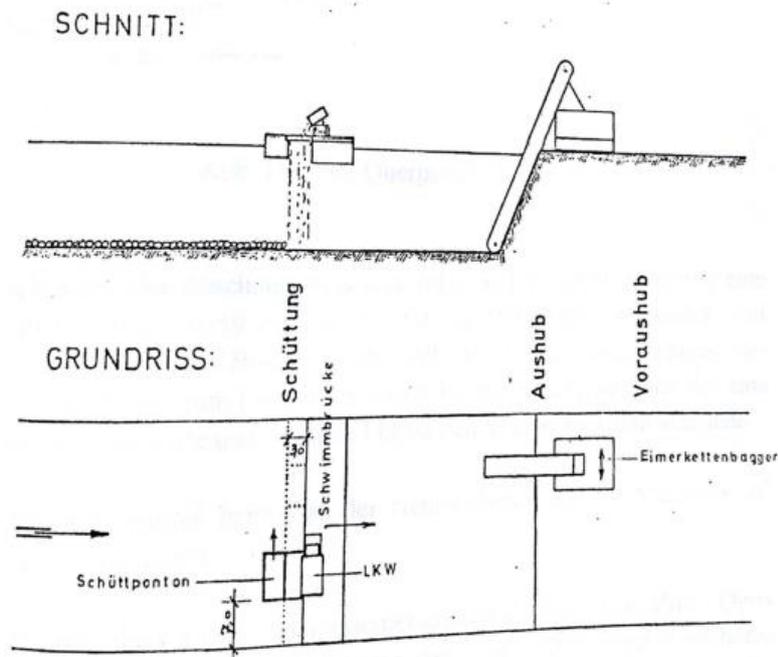


Bild 4. 3 Schematische Einbringvorgang der Sohlrollierung in die Neue Donau (Quelle: Dissertation – Zach)

Insgesamt wurde beim Bau der Neuen Donau etwa 1,4 Mio m<sup>3</sup> Rollierungsmaterial verwendet. Das könnte nach einem neuen Dimensionierungsvorschlag von Prof. Ogris, 1975 doppel reduziert werden. Laut dieses Dimensionierungsvorschlages würde eine Schichtstärke von 20 cm mit Größtkorn von 20 cm genügen, was durch Berechnungen und einige Modellversuche nachgewiesen wurde. Dieser Vorschlag wurde aber nie realisiert.

## 4.2 Salzach

Die Salzach ist mit 225 km Länge der längste und wasserreichste Nebenfluss des Inn in Österreich und Deutschland. Die Salzach ist einer der großen Alpenflüsse und entwässert die östlichen Hohen Tauern nach Norden.



Bild 4. 4 Salzach – Karte (Quelle: wikipedia.org, April 2015)

Die Grenzstrecke der Salzach zwischen der Saalachmündung und der Mündung in den Inn befindet sich in einem Eintiefungsprozess. Diese Tiefenerosion, infolge von Regulierungsmaßnahmen führt nun zu einem Einschneiden der Flusssohle in den kiesigen Untergrund, welches bereits das Ausmaß von bis zu 4 m im Bereich unterhalb der Saalachmündung erreicht hat. Eine Verlangsamung dieser Eintiefungstendenz zeichnet sich nicht ab. Durch die besonderen Gegebenheiten des Flussuntergrundes ist sogar eine Beschleunigung der Eintiefung zu beobachten. Alle in der Wasserwirtschaftlichen Rahmenuntersuchung Salzach entwickelten Lösungsvarianten zum Stoppen des Eintiefungsprozesses der Unteren Salzach enthalten als Bauelemente sogenannte Sohlrollierstreifen in Kombination mit einer uferparallelen Sohlauflerung der Salzach. Die Varianten sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4. 1 Varianten der Sanierung der unteren Salzach mit Kurzbezeichnungen

Variante	Kurzbezeichnung	ergänzende Anmerkungen
Belassen des Ist-Zustandes (Nullvariante)	<b>Variante 0</b>	Untersuchung der zukünftigen Entwicklung der Salzachsohle, wenn keine Maßnahmen getroffen werden; dient als Grundlage für die Planung
Maßnahmen der Geschiebebewirtschaftung	<b>Variante 1</b>	Prüfung, ob nachhaltige Sanierung durch Zugabe von Geschiebe möglich
Flussbettaufweitung	<b>Variante 2</b>	Verbreiterung des Flusses in den Beckenlagen
Blocksteinrampen und Flussbettaufweitung	<b>Variante 2/3</b>	Verbindung von Rampen mit der Verbreiterung des Flusses in den Beckenlagen
Stützkraftstufen und Flussbettaufweitung	<b>Variante 2/4</b>	Verbindung von Wasserkraftnutzung mit der Verbreiterung des Flusses in den Beckenlagen
Kombination der Varianten 2 und 2/3	<b>Variante 2-2/3</b>	Abgeleitet von den Basisvarianten 2 und 2/3
Kombination der Varianten 2	<b>Variante 2-2/4</b>	Abgeleitet von den Basisvarianten 2 und 2/4

(Quelle: Zusammenfassender Bericht „Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchungen Salzach“ – 2000)

Die entwickelten Lösungen umfassen zwei Basisvarianten Variante 2 und Variante 2/3 sowie eine Variantenkombination (Variante 2-2/3), in der einzelne Vorzüge der Basisvarianten vereint wurden:

- *Flussbettaufweitung – Variante 2*

Die wesentlichen Entwurfsmerkmale dieser Variante können in 5 kurzen Punkten verallgemeinert werden:

1. Dem Entwurf liegt im wesentlichen der flussmorphologische Typ „Alternierende Kiesbänke“ zugrunde.
2. Die freie Fließstrecke bleibt im gesamten Abschnitt ohne Fließwechsel erhalten.
3. Die Sohlstabilisierung wird durch Sohlverbreiterungen und Gefällekonzentration im Bereich von Sohlfixierungen erreicht. Die Sohlfixierungen sind als Rollierungstreifen mit einer Mindestlänge von 1 Kilometer und einem Gefälle von 1,5 Promille ausgeführt.
4. Die Ufer werden durch Buhnen im Abstand von 100 Meter gesichert. Die dazwischen befindlichen Abschnitte weisen eine tieferliegende, kiesüberdeckte Längsrollierung auf. Diese Art der Ufersicherung ermöglicht in den Buhnenfeldern eine Umlagerungsdynamik.
5. Die Schiffbarkeit bleibt im bisherigen Umfang erhalten. [10]

Der Grundriss ist so ausgebildet, dass möglichst wenig Fläche beansprucht wird und auf der österreichischen und bayerischen Seite ungefähr gleiche Anteile umfasst. Die gestreckte Linienführung bleibt aus sohlmorphologischen Gründen erhalten, wobei das aufgeweitete Flussbett infolge alternierender Bänke wesentlich struktureicher wird. Eine geringere Sohlbreite im Bereich der Rollierungstreifen soll vermeiden, dass der Wasserspiegel im oberhalb angrenzenden Abschnitt absinkt und in der Folge zu Sohlrosion führt. Die Längsprofilausbildung erfüllt in erster Linie die grundlegenden Voraussetzungen – Hochwasserschutz und Sohlstabilisierung. Die Rollierungstreifen befinden sich wenn möglich an den kritischen Stellen des geologischen Untergrundes. Sie werden in

großen Abständen, etwa 2,5 bis 6 Kilometer, angeordnet, um die Gesamtlänge der Sohlrollierungen zu minimieren und eine hohe Anzahl von alternierenden Bänken zu ermöglichen.

- *Blocksteinrampen und Flussbettaufweitung – Variante 2/3*

Die Entwurfsmerkmale sind:

1. Dem Entwurf liegt im wesentlichen der flussmorphologische Typ „Mäander“ zugrunde.
2. Die freie Fließstrecke ohne Fließwechsel bleibt von der Mündung in den Inn bis zur untersten Rampe bei Fluss-km 33,8 erhalten.
3. Im Bereich der Rampen ist der Wasserspiegel abgetrept.
4. Die Sohle wird lokal durch Rollierungsstreifen gesichert.
5. Die Stabilisierung der Sohle wird durch Gefällekonzentration (vier Querwerke in Form von 1:12 geneigten Blocksteinrampen nach Schauburger – dies entspricht einem Gefälle von rund 8 Prozent) und durch Sohlaufweitung erreicht. Unterhalb der Rampen sind Mäanderstrecken vorgesehen, in denen durch Seitenerosion Geschiebe freigesetzt wird. Dadurch kann der anfängliche Geschiebemangel flussab der Rampen kompensiert werden.
6. In den Mäanderstrecken wird die Seitenerosion durch Rampen und Buhnen initialisiert, ansonsten ist das Flussbett seiner freien Entwicklung überlassen.
7. Die Ufer werden durch Buhnen in Abständen von 75 bis 100 Meter gesichert, die im Anströmbereich einen Kolkschutz aufweisen.
8. Im Bereich der Rampen kann der Schiffsverkehr im derzeitigen Umfang durch technische Maßnahmen erhalten bleiben. [10]

Der Grundriss berücksichtigt die bei Variante 2 angeführten Erfordernisse und so werden die Mäanderstrecken nach flussmorphologischen Kriterien ausgebildet, wobei die Rampenabströmung den Seitenerosionsprozess auslöst. Die Bauwerke sind wegen der großen Belastung bei Hochwasser als Doppelrampen mit zwischenliegender Insel konzipiert. Links- und recht an den Ufern werden die Rampen von hochwasserfreien Deichen begleitet, die höhere Abflüsse zwischen Fluss und Aue aufteilen. Die Rampen werden in Trockenbauweise errichtet. Zwischen Altarm und neuem Salzachlauf wird ein Leitwerk angeordnet, das bei Hochwasser überströmt wird und die Ausströmung in die Aue bestimmt. Für die Längsprofilausbildung sind dieselben Ziele wie bei der Variante 2 maßgebend. Zudem sind für die Lage der Rampen hydraulische Gesichtspunkte von Bedeutung. Wegen der starken Belastung bei Hochwasser sind Rampen in den Beckenlagen zu bevorzugen. So ist es möglich, dass auch über das Vorland Wasser abfließt und die Bauwerke kleiner dimensioniert werden. Die höhenmäßige Festlegung der Rampen und der Planungssohle entsprechen den Erfordernissen des Hochwasserschutzes und der Sohlstabilisierung. Die Wasserspiegel und damit auch die Sohlagen an der Saalachmündung sind die wesentlichen Randbedingungen für zukünftige Planungen in Saalach und Salzach.



Flussbettaufweitung (Variante 2) im Freilassing Becken

Sohlrampe und Aufweitung (Variante 2/3) im Freilassing Becken

Bild 4. 5 Vergleich der Varianten (2 und 2/3) im Freilassing Becken (Quelle: Bericht „Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchungen Salzach“ – 2000)



Flussbettaufweitung (Variante 2) im Tittmoninger Becken

Sohlrampe und Aufweitung (Variante 2/3) im Tittmoninger Becken

Bild 4. 6 Vergleich der Varianten (2 und 2/3) im Tittmoninger Becken (Quelle: Bericht „Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchungen Salzach“ – 2000)

- *Variantenkombination* sieht in Anlehnung an Variante 2 eine Aufweitung der Salzach im Tittmoninger Becken vor. Im Abschnitt zwischen Tittmoning und Nonnreiter Enge sind geringere Aufweitungen geplant, da die Eintiefung nur mäßig vorangeschritten ist und damit eine bessere Überflutung der Auen möglich ist. Weitere Entwurfsmerkmale dieser Variantenkombination sind:
  1. Wegen geringerer Aufweitungsweiten ist der Flächenbedarf ebenfalls geringer.
  2. Die Brücke Tittmoning - Ettenau bei Fluss km 27 muss nicht erneuert werden, lediglich der Pfeiler am linken Ufer ist zu adaptieren.
  3. Aufgrund des geplanten Längsprofils ist kein zusätzlicher Kieseintrag durch Seitenerosion erforderlich (in der Strecke unterhalb von Tittmoning ist lediglich ein sehr geringes Kiespotential nutzbar).
  4. Die Bau- und Instandhaltungskosten liegen etwas niedriger. [10]

Im oberen Tittmoninger Becken führt die Variante 2/3 zu einer Abtreppung des Wasserspiegels, so dass die freie Fließstrecke von der Mündung in den Inn bis Fluss-km 33,8 reicht. Im Tittmoninger Becken überstimmen die wasserwirtschaftlichen Vorteile der Varianten 2/3, es bleibt die freie Fließstrecke bis zum Freilassinger Becken flussab der Surmündung (Fluss-km 52) erhalten. Im Freilassinger Becken ermöglichen die Rampen eine gesicherte Anhebung der Flusssohle bzw. höhere Nieder- und Mittelwasserspiegellagen.

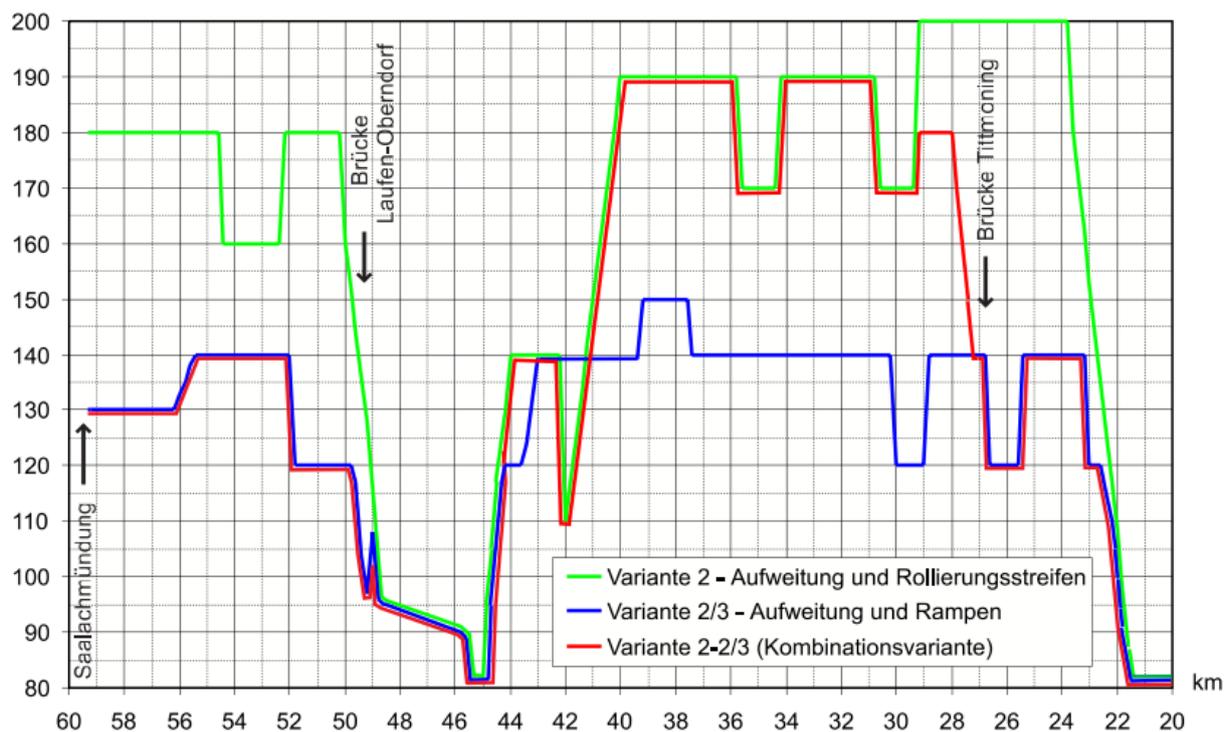


Bild 4. 7 Geplante Breiten der Fluss-Sohle für die Lösungsvarianten (Quelle: Zusammenfassender Bericht „Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchungen Salzach“ – 2000)

Das Generelle Projekt bildet die Grundlage für die Detailplanung einer Sohlabstufung und die erforderlichen Begleitmaßnahmen (Entfernen der Ufersicherung, Uferanpassung Nord, Anbindung Reitbach). Das Hauptziel ist die Anhebung des Wasserspiegels, wodurch es oberstrom zur Anlandung der Sohle kommt und damit zu einer ausreichenden Überdeckung des feinen, erosionsempfindlichen Seetons. Mit der Stützung und der Anlandung der Sohle oberstrom der Sohlabstufung sollen auch die Voraussetzungen für den Bau der zweiten Sohlabstufung geschaffen werden.

Das Ziel dieser Konzepte ist es, durch zwei aufgelöste Rampen bei Fkm 55.4 und 51.9 und eine

eigendynamische Sohlaufweitung (weiche Ufer, 51.9 bis zur Laufener Enge sowie von der Mündung der Saalach bis Sohlabstufung 55.4), eine Sohlstabilisierung im Freilassinger Becken zu erreichen. Oberstrom der Sohlabstufungen setzt unmittelbar nach deren Fertigstellung der Auflandungsprozess ein. Die Folge ist ein temporäres Geschiebedefizit unterstrom der Rampen. Zum Ausgleich dieses Geschiebedefizits und damit zur Vermeidung einer zu großen temporären Eintiefung unterstrom der Rampe, werden die Ufersicherungen entfernt. Das Geschiebedefizit wird durch Kieseintrag infolge einer eigendynamischen Seitenentwicklung zumindest teilweise ausgeglichen. Das noch verbleibende Geschiebedefizit wird durch eine verträgliche Eintiefung der Sohle bis zur Erreichung eines Gleichgewichtsgefälles unterstrom der Sohlabstufung ausgeglichen. Die Gestaltung der Sohlabstufungen erfolgt derart, dass die ökologische Durchgängigkeit gewährleistet wird. Mit der Sohlabstufung wird eine erste Stützung für den Sohldurchschlagsbereich erreicht und gleichzeitig ist es die Basis für die geplante Sohlabstufung im Bereich von Fkm 55.4. Weiters wird eine Ausdehnung des Sohldurchschlagbereichs in Richtung zur Laufener Enge verhindert. Zum Ausgleich des Geschiebedefizits bis zur Laufener Enge wird die vorhandene Ufersicherung unterstrom der Rampe entfernt und weiche Ufer initiiert.

Das Gefälle der Sohlabstufung Fkm 51.9 ist mit  $h:b = 1:50$  vorgesehen. Das prognostizierte Gleichgewichtsgefälle der Salzach unterstrom der Sohlabstufung beträgt  $0.85\text{‰}$  und der Höhenunterschied ca. 2.2 m. Um eine Anpassung ans Ausgleichsgefälle zu erreichen, können Riegel nachträglich hinzugefügt oder entfernt werden. Das Bauwerk ist in einem bestimmten Abflussspektrum sowohl für Fische als auch für Boote passierbar. Für die Bootspassierbarkeit wird in Rampenmitte eine Bootsgasse angeordnet (Bild 4.3)

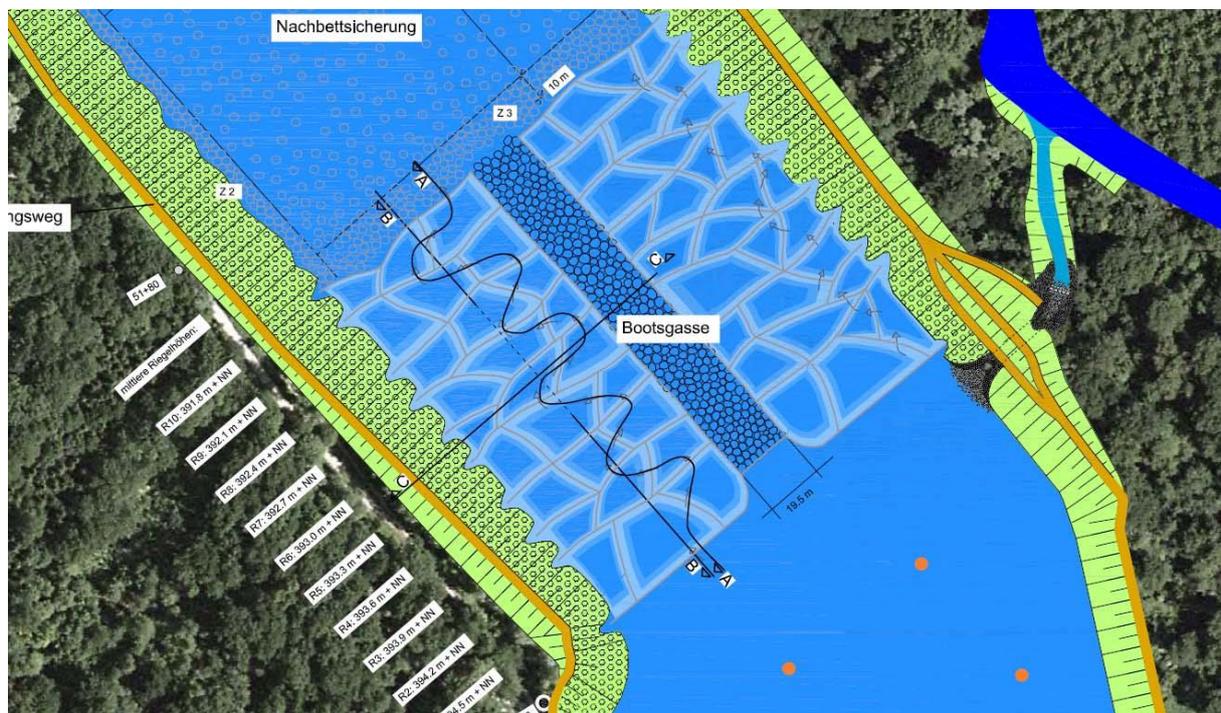


Bild 4. 8 Sohlabstufung Fkm 51.9 (Quelle: Maßnahmen zur Verhinderung der Sohleintiefung und gleichzeitigen Verbesserung des ökologischen Zustandes, Habersack, Hainersdorf, Juli 2009)

Die Untersuchungen zeigten die Notwendigkeit von Uferaufweitungen bis zu einer mittleren Breite der Salzach von 120 m bis 130m. Unter Berücksichtigung der Sandauflage werden durch die Aufweitung ca.  $170.000\text{ m}^3$  Kies aktiviert.

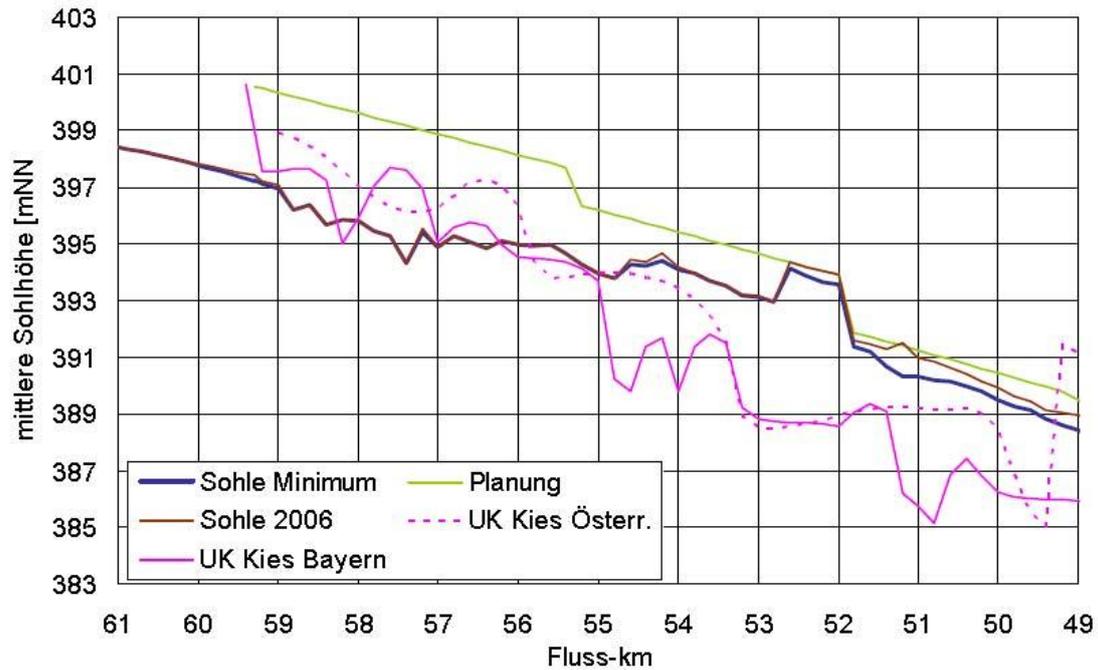


Bild 4. 9 Tiefste Sohlhöhe im Verlauf der Umsetzung gemäß Umsetzungskonzept (Quelle: Maßnahmen zur Verhinderung der Sohleintiefung und gleichzeitigen Verbesserung des ökologischen Zustandes, Univ. Prof. DI Dr. Helmut Habersack, Hainersdorf, Juli 2009)

Die Bauweise verläuft in vier Etagen:

- Auf Stocksetzen des Uferbegleitsaumes
- Gewinnung der Wurzelstöcke vom Treppelweg aus.
- Entfernen des Blockwurfs mit gleichzeitigem Bau einer Baustraße in die Uferböschung (von der Rampe beginnend flussab bis Einmündung Reitbach)
- Endgültige Fertigstellung der Baumaßnahmen durch inselartige Lagerung des Schottermaterials in der Salzach mit gleichzeitigem Rückbau der Baustraße (beginnend beim Reitbach flussaufwärts).



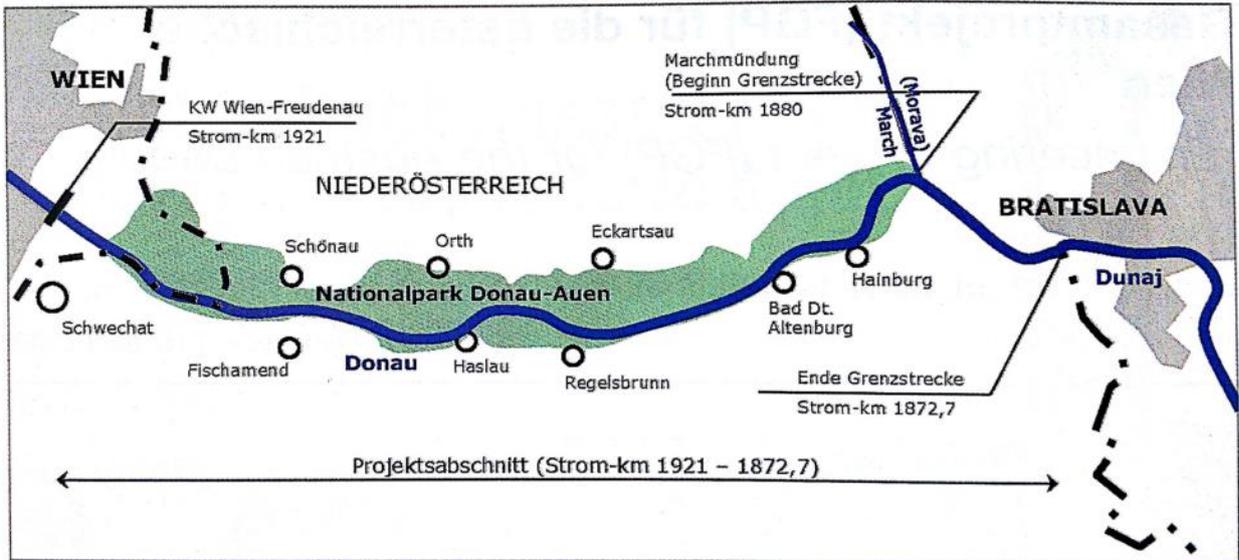


Bild 4. 11 Übersichtskarte, Projektstrecke (Quelle: viaDonau)

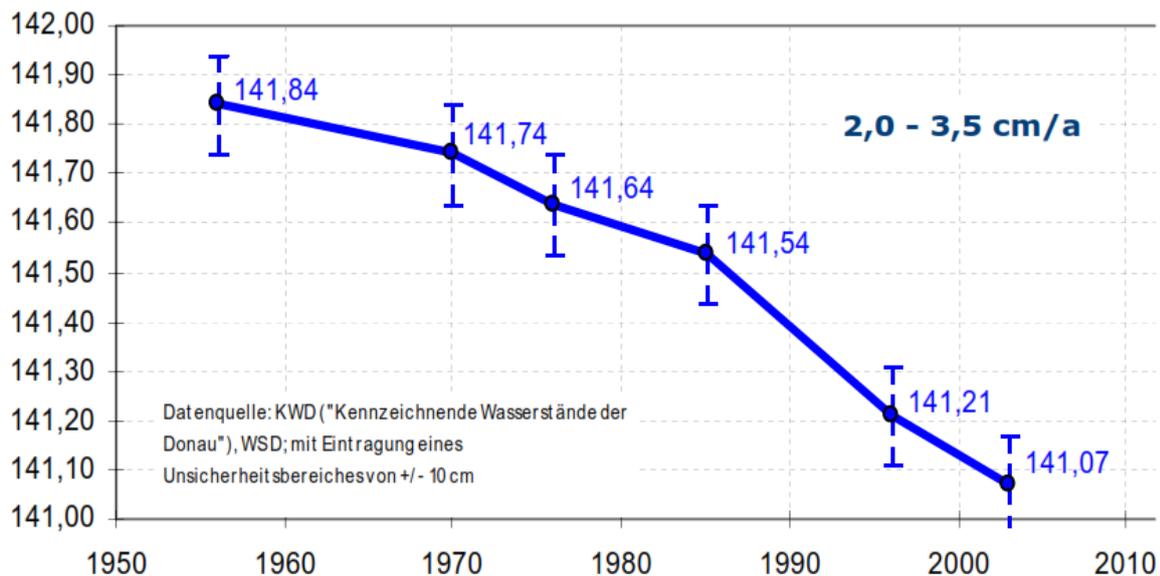
Sehr wichtig ist in diesem Projekt das Erreichen von einer Win-win-Situation zwischen den drei wichtigsten Aspekten – Naturschutz, Schifffahrt und Wasserwirtschaft:

- Der Mehrwert für den Naturschutz besteht darin, dass die für den Nationalpark nachteilige Sohlerosion gestoppt werden kann, Neben- und Altarme soweit wie möglich mit der Donau verbunden werden (Gewässervernetzung) und Uferabschnitte auf über 35 km Uferlinie von Steinsicherungen befreit werden können, wodurch dort eine weitgehend natürliche Umformung der Ufer möglich wird (Uferrückbau);
- der Mehrwert für die Schifffahrt besteht in der höheren Fahrwassertiefe (bzw. Abladetiefe) bei Niederwasser (28 dm über Flächen mit granulometrischer Sohlverbesserung bzw. 27 dm in allen übrigen Teilen der Fahrrinne);
- der Mehrwert aus wasserwirtschaftlicher und wasserbaulicher Sicht besteht in der Stabilisierung der Donau- und Grundwasserstände (auf einem mittleren Niveau, wie es vor etwa zehn bis zwanzig Jahren vorlag, die niederen und mittleren Donauwasserstände werden mit dem Projekt also etwas angehoben) und in der Minimierung der Instandhaltungsbaggerungen (von etwa 140 000 m<sup>3</sup>/Jahr auf etwa 30 000 bis 40 000 m<sup>3</sup>/Jahr). [11]



Bild 4. 12 Integrative Planung ermöglicht Win-Win Lösungen für Schifffahrt und Ökologie (Quelle: viedonau.org, April 2015)

Die größte flussbauliche Herausforderung betrifft die Stopplung der seit Jahrzehnten ablaufenden Sohlerosion. Das Transportvermögen der Donau wird in den meisten Untersuchungen zwischen 300 000 und 400 000 m<sup>3</sup>/Jahr eingeschätzt. Das übersteigt die Geschiebezulieferung, die durch Staustufen und geschieberückhaltende Maßnahmen in der Oberliegerstrecke stark reduziert wurde, und damit kommt es zur Tiefenerosion, der Fluss holt sich sein Geschiebe aus seiner Sohle. Dadurch wird die Flusssohle eingetieft und zwar erreicht diese Eintiefungstendenz ein Ausmaß von 2 bis 3,5 cm/Jahr, im bergwärtigen Teil der Strecke (zwischen Wien und etwa Orth) etwas weniger, im talwärtigen (etwa Orth bis Hainburg) etwas mehr.



$$RNW \Leftrightarrow RNQ=Q(94\%)$$

Bild 4. 13 Sohleintiefungstendenz 1950-2010 (Quelle: viadonau.org, April 2015)

Seit Errichtung der Staustufe Wien-Freudenau wird vom Kraftwerksbetreiber, der Verbund - Austrian Hydro Power AG, eine permanente Geschiebezugabe im Ausmaß von etwa 180 000 bis 190 000 m<sup>3</sup>/Jahr durchgeführt. Diese von der Obersten Wasserrechtsbehörde vorgeschriebene Geschiebebewirtschaftung hat zwei Zielrichtungen:

- einerseits darf es zu keiner Verschlechterung des Geschiebehaushaltes (gegenüber dem Zustand vor Errichtung der Staustufe) kommen, d.h. der Wegfall des Geschiebeaustrages aus dem Wiener Stromabschnitt ist zu kompensieren,
- andererseits soll die Stromsohle innerhalb einer 11 km langen Teilstrecke (zwischen KW Freudenau und Strom-km 1910) stabil gehalten werden.

Grundsätzlich bleibt aber die Sohlerosion stromab dieser Strecke (zwischen Strom-km 1910 und Staatsgrenze) wirksam, die Erosionsdynamik entspricht weitgehend jenem Zustand, der vor Errichtung des Kraftwerkes Freudenau gegeben war. Die Geschiebebilanz für die Strecke wird in der folgenden Tabelle ausgedrückt. [12]

Tabelle 4. 2 Geschiebebilanz für die Strecke zwischen Str.km 1910 und Marchmündung.

	<b>Teilprozess / Teilsumme:</b>	<b>Einträge:</b>	<b>Austräge:</b>
Geschiebetransportvermögen ca. 320.000 m <sup>3</sup> /a	Geschiebeeintrag von der Oberliegerstrecke bzw. AHP-Normalgeschiebezugabe	180.000 m <sup>3</sup>	-
	Geschiebe von Zubringern und aus Seitenerosion	0 m <sup>3</sup>	-
	Abnahme des Geschiebespeichers in der Strecke	190.000 m <sup>3</sup>	-
	Geschiebeentnahme (Baggerungen) f. Inselschüttungen	-	50.000 m <sup>3</sup>
	Verlust durch Abrieb	-	58.000 m <sup>3</sup>
	Geschiebeaustrag in die Unterliegerstrecke	-	262.000 m <sup>3</sup>
	<b>Summe (für ein Regeljahr):</b>		<b>370.000 m<sup>3</sup></b>

(Quelle:Diplomarbeit, Klasz 2002)

Das Flussbauliche Gesamtprojekt ist eine große Gesamtheit von vielen flussbaulichen Maßnahmen:

- *Die granulometrische Sohlverbesserung* ist eine spezielle Form der Geschiebebewirtschaftung mit gleichzeitiger Sohlvergrößerung (Zunahme des mittleren Korndurchmessers der Sohle). Dies wird durch das Schütten eines 20 bis 30 cm starken Grobkiesbelages (der Körnung 40/70 mm) erreicht. Dieser Grobschotter soll sich im Laufe der Zeit durch den Fluss selbst, z.B. durch die Hochwässer mit dem bestehenden Donausohlmateriale vermischen und so zu einer etwa 90 %-igen Reduktion des Geschiebetransportes gegenüber dem heutigen Zustand führen. (Bild 4.7 u. 4.8). Da Gleitufer, Bühnenfelder, Kiesbanke und ähnliche Flächen kaum erodieren, kann der Belag dort entfallen, es müssen daher nur rund 50 % der Mittelwasserbreite belegt werden. Für die gesamte Strecke werden etwa 2,2 Mio. m<sup>3</sup> Grobkies benötigt, und danach (in der Instandhaltungsphase) etwa 40 000 m<sup>3</sup> /Jahr (Kompensieren des Austrages durch das Restgeschiebetransportvermögen).

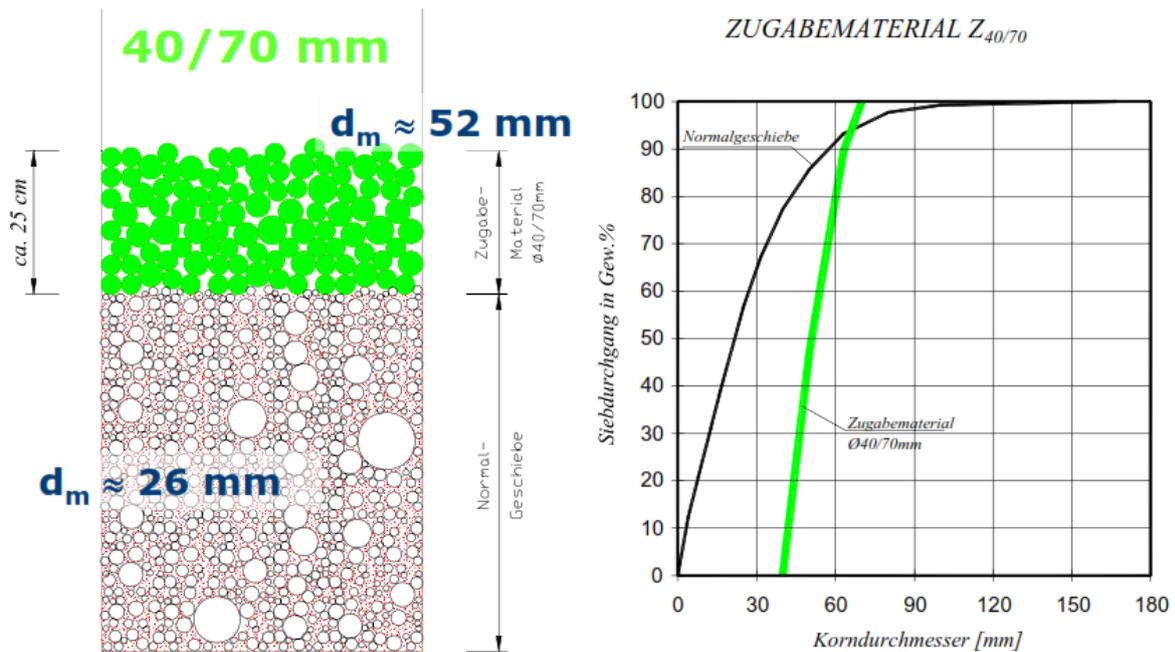


Bild 4. 14 Granulometrische Verbesserung – Zustand I (Quelle: viadonau.org, April 2015)

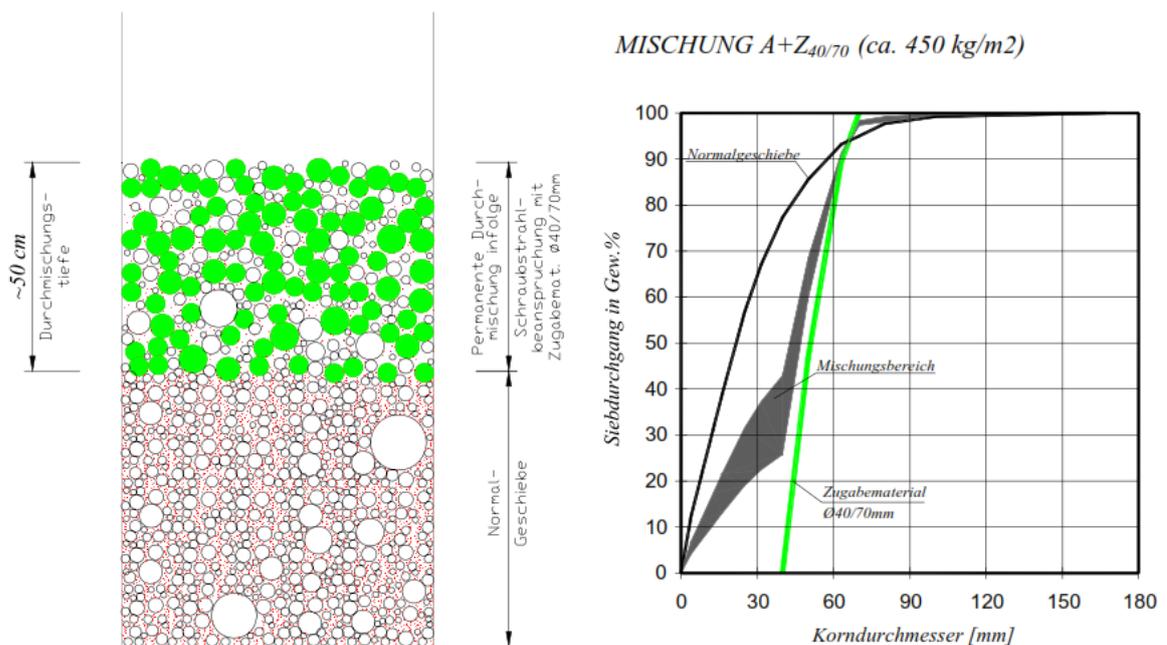


Bild 4. 15 Granulometrische Verbesserung – Zustand II (Quelle: viadonau.org, April 2015)

- **Buhnenoptimierung:** Durch den Bau neuer Buhnen, Optimierung des Buhnenabstandes, oder die Verlängerung bestehender Buhnen kann die Strömung bei Niederwasser stärker in der Fahrrinne konzentriert werden, die Wassertiefen (und auch die Wasserstände) nehmen entsprechend zu. Bei höheren Wasserführungen (also über Niederwasser) werden die Buhnen auf voller Länge überströmt, je höher die Durchflüsse werden, desto geringer wird ihre hydraulische Wirkung. Neben diesem Neubau können aber vielfach auch bestehende Buhnen, sofern sie bei Niederwasser nicht mehr wirksam sind, abgetragen werden. Außerdem können Buhnen (und Leitwerke), die zufolge der Sohlerosion der letzten

Jahrzehnte deutlich über Regulierungsniederwasser hinausragen, abgesenkt werden. Alle diese Aus- und Rückbaumaßnahmen können als "Bühnenoptimierung" bezeichnet werden. Neben der Einengung des Querschnittes durch die gedachte Verbindungslinie der Bühnenköpfe einer Bühnenreihe entsteht durch die Interaktion zwischen Hauptstrom und der Strömung im Bühnenfeld eine zusätzliche Wirbelbildung, welche für einen zusätzlichen Wasserspiegelanstieg sorgt. Zur Verbesserung der ökologische Verhältnisse werden einige Bühnen mit abgesenkter Krone im Bereich der Bühnenwurzeln ausgeführt. Verstärkte Dynamik wird an manchen Stellen durch Aktivierung von Ufererosion durch die Ausführung deklinanter Bühnen erreicht.

- *Stromsohlanpassungen*: In allen bei Regulierungsniederwasser zu seichten Zonen der Fahrrinne (Furten und am Fahrinnenrand entlang von Kiesbanken und Gleitufeln) wird gebaggert, das Baggermaterial wird aber möglichst nahe dazu, in tieferen Zonen (Kolke) des Flusses wieder verklappt. Dadurch bleibt die Stromsohle im Mittel gleich hoch, der Fluss wird aber bezüglich seiner Fließtiefen etwas gleichmäßiger. Auf die Wasserspiegel wirkt diese Maßnahme insgesamt neutral.
- *Uferrückbau*: In Gleitufeln und weniger strömungsexponierten Uferabschnitten, etwa auch im Lee vorgelagerter Kiesbanke und Bühnen, können Ufersicherungen (Steinschüttungen und Steinpflaster) vollständig oder teilweise zurückgebaut werden. Ziel ist eine möglichst natürliche morphologische Entwicklung und Dynamik in diesen Uferzonen. Wenn dadurch eine stärkere Verbreiterung und Aufweitung des Niederwasserquerschnittes zu befürchten ist, muss allerdings der Böschungsfuß (bis zum Niveau des Regulierungsniederwassers) fixiert bleiben (teilweiser Uferrückbau); in allen anderen Abschnitten werden die Ufersicherungen vollständig abgetragen. Insgesamt soll der Uferrückbau und die damit verbundene Dynamisierung etwa 40 % der Uferlinien umfassen. Da der Lauf der Donau insgesamt nicht verändert werden darf, bleiben Prallufer und andere stark angeströmte Ufer von dieser Maßnahme ausgenommen.



*Mit Blockwurf befestigtes Ufer vor den Baumaßnahmen*



*Bereits kurz nach dem Rückbau entwickelte sich ein natürliches Donauufer*

*Bild 4. 16 Beispiel für Uferrückbau (Quelle: viadonau)*

- *Hinterrinner*: Primär (fisch)ökologisch motivierte Baggerungen innerhalb des Mittelwasserbettes, und zwar dort, wo Kiesbanke und Gleitufelzonen durch die Sohlrosion der Donau viel häufiger als früher trocken fallen. In solchen Fällen werden Tiefenrinnen (mit Sohlhöhe deutlich unter Niederwasser) zwischen Kiesbank und Ufer gebaggert, das Baggergut wird in tiefen Zonen der Donau (in Kolken) wieder verklappt. Da solche Hinterrinner weitgehend gegen den Wellenschlag der Schiffe geschützt sind (wegen der

verbleibenden Kiesbank zwischen ihnen und dem Fahrwasser), entstehen dort besonders wertvolle Lebensräume für Jungfische und andere Wasserorganismen.

- **Gewässervernetzung:** Durch die Schaffung von Ein- und Ausströmöffnungen (Uferabsenkungen), den Rückbau von Traversen und lokale Absenkungen bzw. Aufweitungen von Engstellen (durch Baggerungen) soll die Verlandung und Austrocknung der Nebenarme, die bereits durch die große Donauregulierung eingeleitet wurde, so weit wie möglich rückgängig gemacht werden. Ziel ist also einerseits eine deutlich stärkere und häufigere Durchströmung der Nebenarme, und zweitens die Wiederherstellung einer möglichst starken und natürlichen morphologischen Dynamik (mit Seitenerosion, Bildung und Verlagerung von Kies- und Santbänken usw.) dieser Augewässer zu ermöglichen. [11]

Das Flussbauliche Gesamtprojekt kombiniert Maßnahmen, die beiden wichtigen Aspekten entsprechen (ökologischen und verkehrswasserbaulichen) und versucht neue Lösungen, danach orientiert, vorzustellen. Das betrifft einerseits das Erreichen einer dynamischen Form der Sohlstabilität und zweitens die Reduktion der Abhängigkeit von baulichen Handlungen.

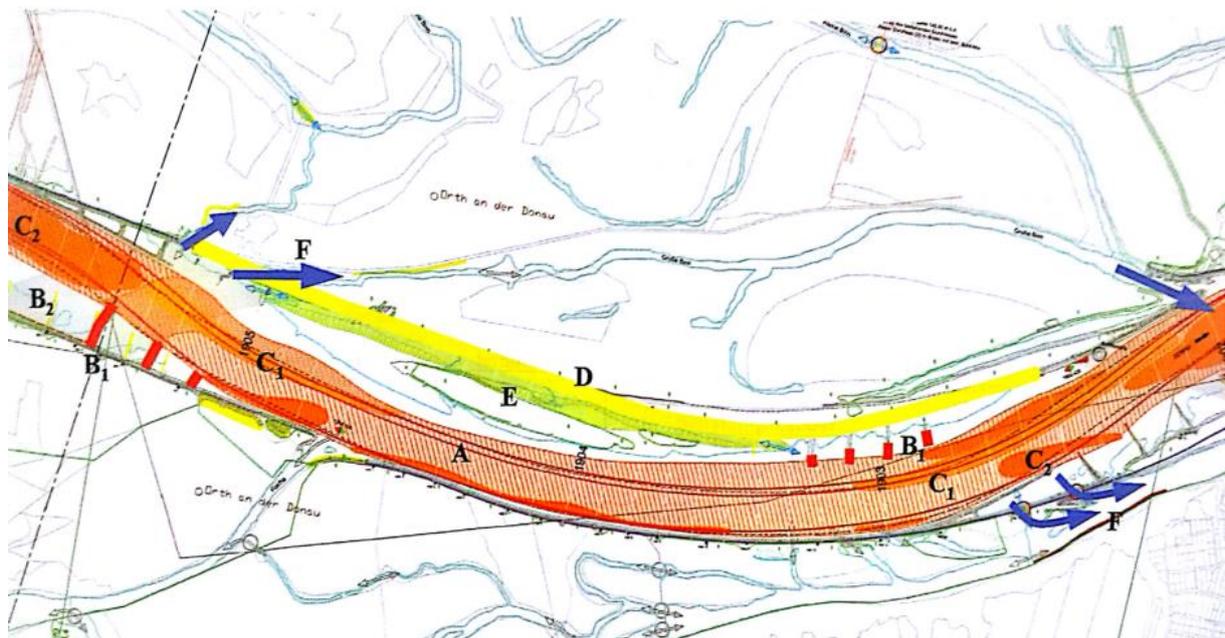


Bild 4. 17 Lageplanausschnitt (ca. Strom-km 1906 bis 1902) mit den wichtigsten Maßnahmengruppen: A – granulometrische Sohlverbesserung, B<sub>1</sub> – Verlängerung bestehender Buhnen bzw. Neubau von Buhnen, B<sub>2</sub> – Buhnenrückbau, C<sub>1</sub> – Baggerungen, C<sub>2</sub> – flächiges Verklappen von Baggergut (in tiefe Zonen des Stromes), D – Ufferrückbau, E – Hinterrinner, F – Gewässervernetzung (Quelle: vieDonau, Zugriff 2009)

## Literatur und verwendete Unterlagen

### 1. Literaturverzeichnis

- [1] „Wikipedia - Erosion (Geologie), Mai 2015, [de.wikipedia.org/wiki/Erosion\\_\(Geologie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Erosion_(Geologie))“ [Online].
- [2] H. Patt, P. Jürging und W. Kraus, "Naturnaher Wasserbau", Springer, 2008.
- [3] A. Gurnel und G. Petts, "Changing river channels", Wiley, 2003.
- [4] p. H. Honsowitz, „Landschaftswasserbau und Flussmorphologie,“ Vienna, TU-Wien, 2012.
- [5] D. Vischer und H. Patt, "Wasserbau", Springer, 2010.
- [6] G. Zach, Disertation, Vienna: TU-Wien, 2004.
- [7] B. Brinkmaier und M. Aufleger, „Fließgewässerkraftwerke,“ *WasserWirtschaft*, 2011.
- [8] p. N. Krouzecky, "Buhnen", TU-Wien, Vienna, 2004.
- [9] H. Stiefelmeyer, Dissertation - Dynamische Sohlstabilisierung durch Grobkornanreicherung, Vienna: TU-Wien, 2001.
- [10] Arbeitsgruppe, "Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchungen Salzach", 2000.
- [11] viaDonau, Fachjournal "Flussbauliches Gesamtprojekt ostlich von Wien", Vienna, 2009.
- [12] G. Klasz, Ein Betrag zur flussmorphologisch orientierten Untersuchungen der Sohlstabilität der Donau zwischen Wien und Marchmündung, Vienna: TU-Wien, 2002.
- [13] M. S. Yalin, "River Mechanics", Pergamon Press, 2003.
- [14] H. Nachtnebel, "Gewässerplanung und konstruktiver Wasserbau", 2003.
- [15] K. Felkel, „Die Geschiebezugabe als flussbauliche Lösung des Erosionsproblems des Oberreins,“ 1980.
- [16] F. Pöhler und R. Klocke, „Herausforderungen für die „große Wasserkraft“,“ *WasserWirtschaft* 8/2011, 2013.

- [17] H. Habersack, M. Liedermann, M. Tritthart, C. Hauer, M. Klösch, G. Klasz und M. Hengl, „Maßnahmen für einen modernen Flussbau betreffend Sohlstabilisierung und Flussrückbau – Granulometrische Sohlverbesserung, Bühnenoptimierung, Uferrückbau und Gewässervernetzung,“ *WasserWirtschaft*, 2012.
- [18] Hauer, H. Habersack, B. Blamauer, H. Villwock, D. Prenner und C. Hauer, „Feststoffhaushalt, Sedimenttransport und Flussmorphologie im Rahmen des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans,“ *WasserWirtschaft*, 2014.
- [19] P. Przedwojski, R. Blazejewski und K. W. Pilarczyk, River training techniques.
- [20] U. Stephan und R. Schmalfuß, „Granulometrische Sohlverbesserung Konzeption und Modellversuche,“ viaDonau, Vienna, 2006.
- [21] W. Workshop der, FLUSSAUFWEITUNGEN - Möglichkeiten und Grenzen, Zürich: Prof. Dr.-Ing. H.-E. Minor, 2007.
- [22] P. Jürging und H. Patt, Fließgewässer- und Auenentwicklung, Springer, 2004.

## 2. Bilderverzeichnis

Bild 2.1 Einflussfaktoren auf die Fließgewässerentwicklung .....	9
Bild 2.2 Prall- und Gleitufer .....	10
Bild 2.3 Akkumulationsstrecken .....	11
Bild 2.4 Linienführung – Wechsel von Prall- und Gleitufer in einem Fließgewässer .....	11
Bild 2.5 Laufentwicklung in Abhängigkeit vom Gefälle und bordvollem Abfluss .....	12
Bild 2.6 Mäandrierendes Fließgewässer .....	12
Bild 2.7 Laufformen von Fließgewässern .....	13
Bild 2.8 Schema zum Feststofftransport .....	14
Bild 2.9 Hiding-Effekt bei der Ausbildung der Gewässersohle .....	17
Bild 2.10 Bewegungsbeginn für Quarzmaterial.....	18
Bild 2.11 Verteilung der Schubspannung in einem trapezförmigen Gerinnequerschnitt.....	18
Bild 2.12 Schema zum Schubspannungsansatz im Gewässerbett.....	19
Bild 2.13 Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos nach Zanke .....	21
Bild 2.14 Erweitertes Shields-Diagramm mit Bereichen für verschiedene Mobilitätszustände .....	21
Bild 2.15 Sohlenformen in Abhängigkeit von sedimentologischen und hydraulischen Einflussgrößen – Quarzmaterial – ( $\rho_F = 2650 \text{ kg/m}^3$ ; $\rho_W = 1000 \text{ kg/m}^3$ ; $T = 18 \text{ °C}$ ) (nach Zanke).....	22
Bild 2.16 Geschiebefunktionen von Einstein und Einstein & Brown.....	24

Bild 3.1 Festes Wehr .....	26
Bild 3.2 Bewegliches Wehr .....	27
Bild 3.3 Vergleich der Wehrtypen .....	27
Bild 3.4 Erosionsstrecken bei Wehren.....	28
Bild 3.5 Ansicht – Kraftwerk Freudenuau .....	29
Bild 3.6 Konzept des Fließgewässerkraftwerkes am Beispiel der Wasserstand-Abfluss-Beziehung.....	30
Bild 3.7 Sohlenbauwerke.....	31
Bild 3.8 Skizze – Stützschwelle .....	31
Bild 3.9 Stützschwelle in der Natur .....	32
Bild 3.10 Grundschwellen – Skizze 10-fach überhöht.....	32
Bild 3.11 Sohlschwelle .....	33
Bild 3.12 Absturz (DIN 19661-2).....	33
Bild 3.13 Absturztreppe (DIN 19661-2).....	34
Bild 3.14 Sohlengleite .....	34
Bild 3.15 Bühnenpaare und linksseitige Bühnen an der Ruhr südlich von Bochum. ....	35
Bild 3.16 Bezeichnung einer Buhne.....	36
Bild 3.17 a.Orthogonale Buhne auf Mittelwasserniveau (durch Sohleintiefung), vor Optimierung; b.Neue, deklinante auf Niederwasser plus 30 cm abgesenkte, nicht vollständig ans Ufer angebundene Buhne. ....	37
Bild 3.18 Bühnenwirkung – deklinant, orthogonal und inklinant .....	37
Bild 3.19 Steinbuhne .....	38
Bild 3.20 Packwerksbuhne .....	38
Bild 3.21 Buhne in gemischter Bauweise .....	39
Bild 3.22 Drahtbuhne .....	39
Bild 3.23 Laufverlängerung – Situation bei der Lippe .....	40
Bild 3.24 a. Mäanderwiederanbindung an der Raab, Öffnung des Einlaufbereiches, b. Sedimentationsbereiche aus Modellversuch, dunkle Bereiche .....	40
Bild 3. 25 Abgeflachte Sohle.....	41
Bild 3. 26 Beispiel für die Sohlrollierung .....	41
Bild 3. 27 Methode der Geschiebezugabe .....	43
Bild 3. 28 Verlauf einer Geschiebezugabe.....	44
Bild 3. 29 Prinzipskizz einer künstlichen Deckschichtbildung .....	45
Bild 3. 30 Schematische Skizze – Grobkornzugabe .....	45
Bild 3. 31 Schema einer Flussaufweitung.....	46
Bild 3. 32 Eigendynamische Aufweitung durch Seitenerosion.....	47
Bild 4.1 Die Neue Donau im Bereich zwischen Kaisermühlen und Floridsdorf; links die Donau .....	48
Bild 4.2 Übersicht Donauraum Wien.....	49
Bild 4.3 Schematische Einbringsvorgang der Sohlrollierung in die Neue Donau .....	50
Bild 4.4 Salzach – Karte.....	51
Bild 4.5 Vergleich der Varianten (2 und 2/3) im Freilassinger Becken.....	54
Bild 4.6 Vergleich der Varianten (2 und 2/3) im Tittmoninger Becken.....	55
Bild 4.7 Geplante Breiten der Fluss-Sohle für die Lösungsvarianten .....	56
Bild 4.8 Sohlabstufung Fkm 51.9 .....	57
Bild 4.9 Tiefste Sohlage im Verlauf der Umsetzung gemäß Umsetzungskonzept.....	58

Bild 4.10 Ziele und Maßnahmen bei FGP .....	59
Bild 4.11 Übersichtskarte, Projektstrecke .....	60
Bild 4.12 Integrative Planung ermöglicht Win-Win Lösungen für Schifffahrt und Ökologie.....	60
Bild 4.13 Sohleintiefungstendenz 1950-2010 .....	61
Bild 4.14 Granulometrische Verbesserung – Zustand I .....	63
Bild 4.15 Granulometrische Verbesserung – Zustand II .....	63
Bild 4.16 Beispiel für Ufferrückbau.....	64
Bild 4.17 Lageplanausschnitt (ca. Strom-km 1906 bis 1902) mit den wichtigsten Maßnahmengruppen: A – granulometrische Sohlverbesserung, B <sub>1</sub> – Verlängerung bestehender Buhnen bzw. Neubau von Buhnen, B <sub>2</sub> – Buhnenrückbau, C <sub>1</sub> – Baggerungen, C <sub>2</sub> – flächiges Verklappen von Baggergut (in tiefe Zonen des Stromes) , D – Ufferrückbau, E – Hinterrinner, F – Gewässervernetzung .....	65

### 3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2. 1 Flussregime-Typen .....	15
Tabelle 2.2 Schätzwerte für die mittlere kritische Geschwindigkeit $v_{m,cr}$ für kohäsive Sedimente .....	23
Tabelle 4. 1 Varianten der Sanierung mit Kurzbezeichnungen .....	52
Tabelle 4. 2 Geschiebebilanz für die Strecke zwischen Str.km 1910 und Marchmündung. ....	62