

# Hydraulik naturnaher Fließgewässer

Teil 1 – Grundlagen und empirische  
hydraulische Berechnungsverfahren



# **Hydraulik naturnaher Fließgewässer**

## Teil 1 – Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren



Herausgegeben von der  
Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
1. Auflage

Karlsruhe 2002

**IMPRESSUM**

<b>Herausgeber</b>	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg  76157 Karlsruhe · Postfach 21 07 52, <a href="http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de">http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>ISSN</b>	1436-7882 (Bd. 74, 2002)
<b>Bearbeitung</b>	Universität Karlsruhe (TH), Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
<b>Redaktion</b>	Landesanstalt für Umweltschutz Referat 41
<b>Umschlaglayout</b>	Stefan May • Grafik-Design, 76227 Karlsruhe
<b>Titelbild</b>	Jutta Ruloff • Dipl. Designerin, 76275 Ettlingen
<b>Druck</b>	Greiserdruck GmbH & Co. KG • 76437 Rastatt
<b>Umwelthinweis</b>	gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier
<b>Bezug über</b>	Verlagsauslieferung der LfU bei JVA Mannheim - Druckerei, Herzogenriedstr. 111, 68169 Mannheim Telefax 0621/398-370
<b>Preis</b>	11 €

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

# Inhaltsverzeichnis

## Zusammenfassung

<b>1. Hinweise zum Leitfaden .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Hydraulische Grundlagen .....</b>	<b>12</b>
2.1 Bewegungsarten des Wassers in einem offenen Gerinne.....	12
2.2 Kontinuitätsgleichung.....	16
2.3 Energiegleichung nach BERNOULLI .....	16
2.4 Die allgemeine Fließformel .....	17
2.5 Die empirische Fließformel nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER (GMS-Formel).....	20
<b>3. Literaturangaben für den STRICKLER-Beiwert <math>k_{st}</math>.....</b>	<b>21</b>
<b>4. Datengrundlagen .....</b>	<b>25</b>
4.1 Geometrie von Gewässer .....	25
4.2 Geschwemmsellinien und Hochwassermarken .....	29
4.2.1 Geschwemmsellinien .....	29
4.2.2 Erfassen von Flutmulden und Geschwemmsellinien .....	31
4.2.3 Darstellen von Geschwemmsellinien .....	32
4.2.4 Bewerten von Geschwemmsellinien .....	32
4.2.5 Hochwassermarken .....	33
4.2.6 Setzen und Einmessen von HW-Marken .....	33
4.3 Erfassen von Bewuchs .....	34
4.4 Rauheits- und Widerstandsbeiwerte.....	35
4.5 Formblätter .....	35
<b>5. Berechnung von Abfluss oder Wasserstand in Gerinnen mit der GMS-Formel.....</b>	<b>39</b>
5.1 Gerinnegeometrie: Aufteilung in kompakte und gegliederte Gerinne .....	39
5.1.1 Kompakte Gerinne .....	41
5.1.2 Gegliederte Gerinne.....	43
5.2 Bestimmung des $k_{st}$ -Wertes .....	45
5.2.1 Verfahren nach COWAN.....	46
5.2.2 Verfahren nach EINSTEIN/HORTON .....	50
5.2.3 Verfahren nach SELLIN .....	53



---

5.3 Verfahren zur Abflußberechnung auf Grundlage der GMS-Formel .....	56
5.3.1 Berechnung in einem Schritt .....	56
5.3.2 Gegliederte Berechnung .....	60
5.3.3 Flächenabzugsverfahren.....	63
<b>6. Beispiele .....</b>	<b>68</b>
6.1 Dimensionierung eines Trapezquerschnittes für ein Verbindungsgewässer .....	69
6.2 Ermittlung der Abflusskurve bei einem unregelmäßigen Doppeltrapezprofil .....	71
6.3 Anwendung der Formblätter im Feldeinsatz zur Abschätzung der Abflussleistung eines Baches.....	74
6.4 Vereinfachte Ermittlung von Überflutungsflächen für ein Bemessungshochwasser.....	78
6.5 Rekonstruktion eines Abflussereignisses anhand von Geschwemmsellinien .....	80
6.6 Vereinfachte Wasserspiegellagenberechnung .....	85
<b>7. Verwendete Formelzeichen (nach DIN 4044) .....</b>	<b>89</b>
<b>8. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>90</b>
<b>9. Bildnachweis.....</b>	<b>93</b>

## Hydraulik naturnaher Fließgewässer

### Teil 1: Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren

- Hydraulische Grundlagen; allgemeines Fließgesetz
- Ansatz zur Abflussberechnung nach Gauckler-Manning-Strickler; Definition des Rauheitsbeiwertes  $k_{st}$
- Literaturangaben für den Rauheitsbeiwert  $k_{st}$  (tabellarischer Vergleich)
- Erfassen und Bewerten von Bewuchs, Geschwemmsellinien, Hochwassermarken und Gerinnegeometrien für eine empirische hydraulische Berechnung
- Vorgehensweise bei der Berechnung; Erfassen der hydraulischen Situation; richtiges Anwenden der Verfahren
- Beispiele

### Teil 2: Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen

- Theoretische Grundlagen; Gültigkeitsbereich der analytischen Ansätze
- Praktisches Vorgehen; Berechnungsverfahren naturnaher Fließgewässer unter Berücksichtigung von Grobstrukturen

### Teil 3: Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg

- Bedeutung der Beiwerte für eine hydraulische Berechnung
- Dokumentation und Vergleich verschiedener Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für ausgewählte Gewässerteilstrecken in Baden-Württemberg
- Katalogisierter Aufbau mit Fortschreibungs- und Übertragungsmöglichkeit auf DV-Systeme

### Teil 4: Numerische Modelle zur Strömungssimulation

- Erläuterung der numerischen Verfahren (1-D bis 3-D), deren Grundlagen und Anwendungsbereiche sowie Anwendungsgrenzen)
- Erfahrungssammlung aus Ingenieurbüros und Universitäten des Landes
- Testdatensatz für kommerzielle numerische Programme
- Sonderfall: vereinfachtes Excel-Modul „Pegelhydraulik“



## Zusammenfassung

Der vorliegende Leitfadenteil „Hydraulik naturnaher Fließgewässer, Teil 1 - Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren“ ist Bestandteil der Schriftenreihe „Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie“. In dieser Schriftenreihe werden Arbeitshilfen zur naturnahen Gewässerentwicklung und –unterhaltung sowie zum naturnahen Wasserbau herausgegeben.

Mit dem vorliegenden Leitfaden, der sich gleichermaßen an Behörden, Planer und Lehrinstitutionen richtet, sollen dem Anwender verschiedene Methoden zur hydraulischen Berechnung naturnaher Fließgewässer vermittelt werden.

Die derzeit vorliegenden 4 Teile des Leitfadens (siehe Übersicht) bauen thematisch aufeinander auf, sind jedoch in sich abgeschlossen. In jedem Teil wird ein Themenbereich der „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“ für sich verständlich dargestellt. Weitere Themen wie z.B. die „Morphodynamik der Fließgewässer“ können bei Bedarf, bei weiterentwickelten praktikablen Berechnungsverfahren und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen aufgenommen werden.

Der vorliegende Teil 1 behandelt die Grundlagen der Hydraulik und die bestehenden empirischen Ansätze zur Berechnung von Wasserstand bzw. Abfluss. Er dient als Einstieg und Auffrischung der angewandten Fließgewässerhydraulik. Es wird schwerpunktmäßig auf einfache und anwenderfreundliche Formeln und Verfahren eingegangen.

Die Grundlage des Fließgesetzes von Brahms und de Chezy werden erläutert. Darauf aufbauend werden Methoden zur überschlägigen Berechnung von Abfluss oder Wasserstand sowie der Beziehung nach Gaukler-Manning-Strickler (GMS-Formel) aufgezeigt. Es werden einfache Möglichkeiten zur Abschätzung der relevanten Beiwerte gegeben. Diese Beiwerte können in der Regel im Gewässer nicht gemessen werden und müssen daher vom Anwender geschätzt werden. Die in diesem Leitfaden dokumentierten Rauheits-Beiwerte stellen eine umfassende Hilfe für die Praxis dar.

Anhand von praxisnahen Berechnungsbeispielen werden wichtige Erfahrungen zur hydraulischen Bemessung von naturnahen Fließgewässern aufgezeigt. Dabei wird insbesondere auf die Erkenntnisse der Pilotstrecken Enz im Bereich Pforzheim und Murr im Bereich Steinheim eingegangen.

Diese Grundlagen sind wichtig für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit eines Gerinnes in und außerhalb von Ortslagen und damit von großer Bedeutung in bezug auf die Gewässerunterhaltung und zum Schutz der Anlieger vor Hochwasser.

## 1. Hinweise zum Leitfaden

Die Wiederherstellung und Erhaltung einer intakten Umwelt stellt die wichtigste Aufgabe der Wasserwirtschaft dar. Eine Voraussetzung hierfür sind Gewässer, die möglichst viele natürliche Elemente enthalten, über eine gute Wasserqualität verfügen und somit als Lebensraum für eine artenreiche Flora und Fauna dienen.

Deshalb sind in den verschiedensten Bereichen des Wasserbaus, im Flussbau, bei der Sicherstellung der Vorflut urbaner und landwirtschaftlich genutzter Gebiete, bei Maßnahmen des Hochwasserschutzes und der Wildbachverbauung sowie beim Energie- und Verkehrswasserbau Gewässer naturnah zu erhalten oder herzustellen.

Mit dem vorliegenden Leitfaden sollen dem Anwender verschiedene Methoden zur hydraulischen Berechnung naturnaher Fließgewässer erläutert werden.

Der Leitfaden besteht derzeit aus vier Teilen, die schwerpunktmäßig jeweils ein bestimmtes Themengebiet bearbeiten. Die Gliederung der auf-

einander aufbauenden Teile ist der Abbildung „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“ (Seite 5) zu entnehmen. Weitere Themen wie z.B. die „Morphodynamik der Fließgewässer“ können zukünftig aufgenommen werden.

*„Schon bisher war die hydraulische Bemessung der Abflussquerschnitte von Fließgewässern schwierig und mit vagen Annahmen verbunden. [...] Keine großen Schwierigkeiten im Umgang mit Zahlen, hydraulischen Tafeln und Tabellen hat nur der Anfänger. Wer dagegen Gelegenheit hatte zu beobachten, wie sich ausgebaute Gewässer im Laufe von Jahrzehnten mannigfaltig verändern und damit ursprüngliche Berechnungsgrundlagen hinfällig werden, der wird die Berechnung wohl nicht ganz in Frage stellen, ihre Bedeutung aber entsprechend gewichten. Wie in der Natur eine Normung unmöglich ist, so entzieht sich auch ein Fließgewässer aufgrund seiner natürlichen und im Voraus nicht bestimm- baren Eigendynamik allen Berechnungsregeln.“*  
Zitat von G. SCHADE, entnommen aus [14].



Abb. 1: Natürlicher Gewässerverlauf eines Baches mit Uferbewuchs



Um einen inhaltlichen Überblick zu geben, wird nachfolgend jeder Teil des Leitfadens kurz beschrieben.

### **Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 1**

„Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren“

Der vorliegende **Teil 1** beschäftigt sich mit den Grundlagen und den empirischen hydraulischen Berechnungsverfahren. Ziel dieses Leitfadens ist es, dem Anwender einen Einblick in die hydraulischen Gesetzmäßigkeiten von Fließvorgängen zu geben. Dabei wird schwerpunktmäßig auf einfache und anwenderfreundliche Formeln und Verfahren eingegangen, um dem Leser die Grundlagen der angewandten Fließgewässerhydraulik verständlich zu machen.

### **Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 2**

„Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen“

Im **Teil 2** wird auf Grundlage von eindimensionalen Berechnungsverfahren in übersichtlicher Form für jede Grobstrukturen jeweils ein geeignetes Berechnungsverfahren vorgestellt.

Dieser Teil des Leitfadens ermöglicht es dem Anwender, das Widerstandsverhalten lokaler naturnaher Fließgewässerstrukturen abzuschätzen. Erstmals sind die Berechnungsverfahren mit Ablaufdiagrammen und praktischen Beispielen erläutert.

### **Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 3**

„Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg“

Der **Teil 3** des Leitfadens dient als Ergänzung des hier vorliegenden ersten Teiles.

In katalogisierter und übersichtlicher Form wird eine Dokumentation von Rauheits- und Widerstandsbeiwerten für ausgewählte naturnahe Gewässerteilstrecken in Baden-Württemberg aufgezeigt. Neu hierbei ist, dass neben den empirischen Rauheits-Beiwerten auch die Wider-

standsbeiwerte für Bewuchs- und Sohlstruktur angegeben werden.

Damit wird es dem Anwender ermöglicht, einerseits ein Gefühl für die empirischen Rauheitsbeiwerte zu entwickeln und andererseits direkt einen Bezug zu den analytischen Berechnungsverfahren, wie sie im Teil 2 beschrieben werden, zu bekommen.

### **Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 4**

„Numerische Modelle zur Strömungssimulation“

**Teil 4** des Leitfadens beschreibt gegenwärtig angewandte, numerische Berechnungsverfahren. Grundlage hierfür ist eine von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) durchgeführte Umfrage bei Ingenieurbüros in Baden-Württemberg.

Die einzelnen Berechnungsverfahren werden dabei prinzipiell erläutert, ohne dass auf mathematisch-theoretische Details näher eingegangen wird. Es soll gezeigt werden, auf welche numerische Grundlagen DV-gestützte Berechnungsverfahren aufbauen, wie sie prinzipiell arbeiten und wo deren Anwendungsbereiche sowie -grenzen liegen. Dabei werden eindimensionale, zweidimensionale und dreidimensionale Verfahren erläutert und typische Einsatzmöglichkeiten genannt.

Zusätzlich wird ein Datensatz zum Testen kommerzieller EDV-Programme beigefügt. Die Daten stammen von einer Pilot-Gewässerstrecke der LfU. Zur Durchführung hydraulischer Berechnungen an Pegeln für Planung und Plausibilisierung wird ein Excel-Modul mit Benutzeranleitung beigefügt.



Abb. 2: Jungweiden an der Pilotstrecke Murr im Bereich Steinheim, die sich infolge eines Hochwassers umgelegt haben.

Wie die Bewuchscharakteristik vor Ort aufgenommen werden sollte, damit der abflussreduzierende Bewuchseinfluss in einer Berechnung simuliert werden kann, wird im Teil 1 und 2 des Hydraulik-Leitfadens beschrieben.

Abb. 3: Mäandrierende Mittelwasserläufe stellen bei einer hydraulischen Berechnung einen schwierigen Fall dar.

Welche Reibungsverluste treten infolge der Krümmungen auf? Wie wirkt sich der Uferbewuchs auf die Abflussleistung aus?

Besonders aufwendig wird eine Berechnung ab Wasserständen, bei denen das Wasser aus dem Mittelwasserbett austritt und zusätzlich über die Vorländer strömt.

In solchen Fällen muss die hydraulische Situation sehr sorgfältig abgeschätzt und durch entsprechende Berechnungsannahmen umgesetzt werden.

Arbeitshilfen dazu werden in den Teilen 1, 2 und 4 gegeben.



Abb. 4: Im Strömungsschatten eines Brückenpfeilers hat sich durch Sedimentation eine Insel gebildet.

Mit Hilfe von Teil 1 kann abgeschätzt werden, wie sich die Ablagerung auf die Abflussleistung des Gerinnes auswirkt.





Abb. 5: Extrem dichter Uferbewuchs hat meistens starke Auswirkungen auf den Wasserstand und Abfluss bei Hochwasserereignissen.

Gerade bei Weichhölzern kommt es ab einem bestimmten Wasserstand infolge der Strömungskraft zu einem plötzlichen „Umlegen“ des Bewuchses. Damit verringert sich dann das Widerstandsverhalten der Ufergehölze schlagartig.

All diese Einwirkungen müssen bei einer hydraulischen Berechnung berücksichtigt werden. Wie das durch vereinfachte Annahmen möglich ist, wird im Teil 1 beschrieben. Im Teil 2 werden dazu analytische Berechnungsverfahren erläutert.



Abb. 6: Aufweitung des Flussschlauches durch eingebaute Inseln bei der renaturierten Gewässerstrecke in der Ortslage Pforzheim (Enz) bei Mittelwasserabfluss. Welchen Einfluss haben die Inselstrukturen bei Hochwasser und wie wird dadurch die Abflussleistung beeinträchtigt? Ansätze zur hydraulischen Berechnung werden im Leitfaden Teil 1 und Teil 2 gegeben.

## 2. Hydraulische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die hydraulischen Grundlagen zur Herleitung der allgemeinen Fließformel erläutert.

Im weiteren Verlauf wird auf die Ableitung der empirischen Fließformel nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER (GMS-Formel) eingegangen. Hierbei werden dem Anwender die Stärken und Schwächen sowie die Anwendungsgrenzen der GMS-Formel erklärt.

### 2.1 Bewegungsarten des Wassers in einem offenen Gerinne

Der Fließbewegungsvorgang von Wasser ist in offenen Gerinnen stets **dreidimensional**. Eine mathematische Erfassung und Beschreibung der Fließbewegung wird durch Vereinfachungen möglich.

Trifft man die Annahme, dass es sich um einen gleichartigen Bewegungsverlauf der Wasserteilchen in parallelen Ebenen handelt, so spricht man von einer **zweidimensionalen** Berechnung des Fließvorganges.

Die Annahme, dass alle Flüssigkeitsteilchen im Gerinne mit gleicher Geschwindigkeit in parallelen Bahnen fließen entspricht einer weiteren Vereinfachung. Man spricht dann von einer **ein-dimensionalen** Berechnung.

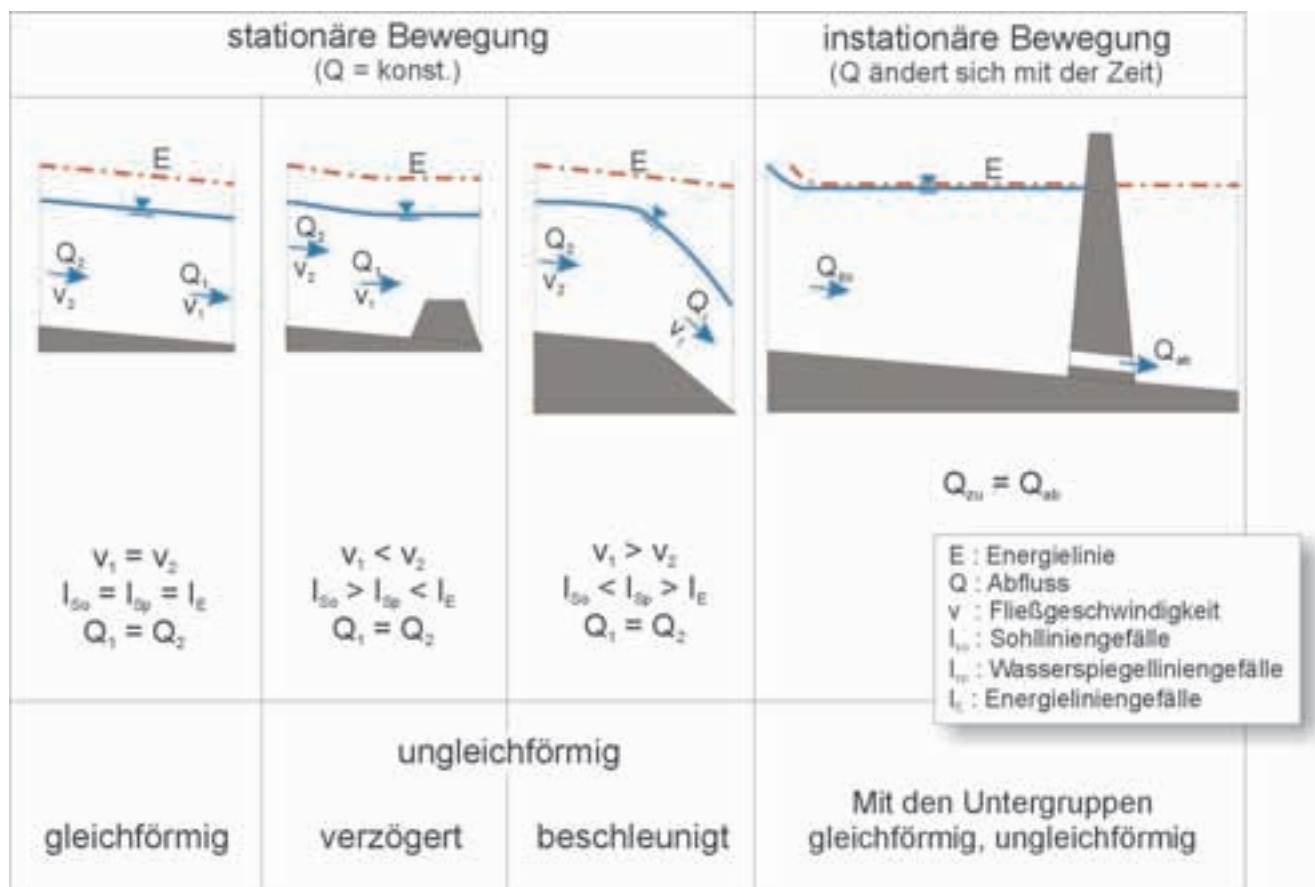


Abb. 7: Bewegungsarten des Wassers. Verändert [9]

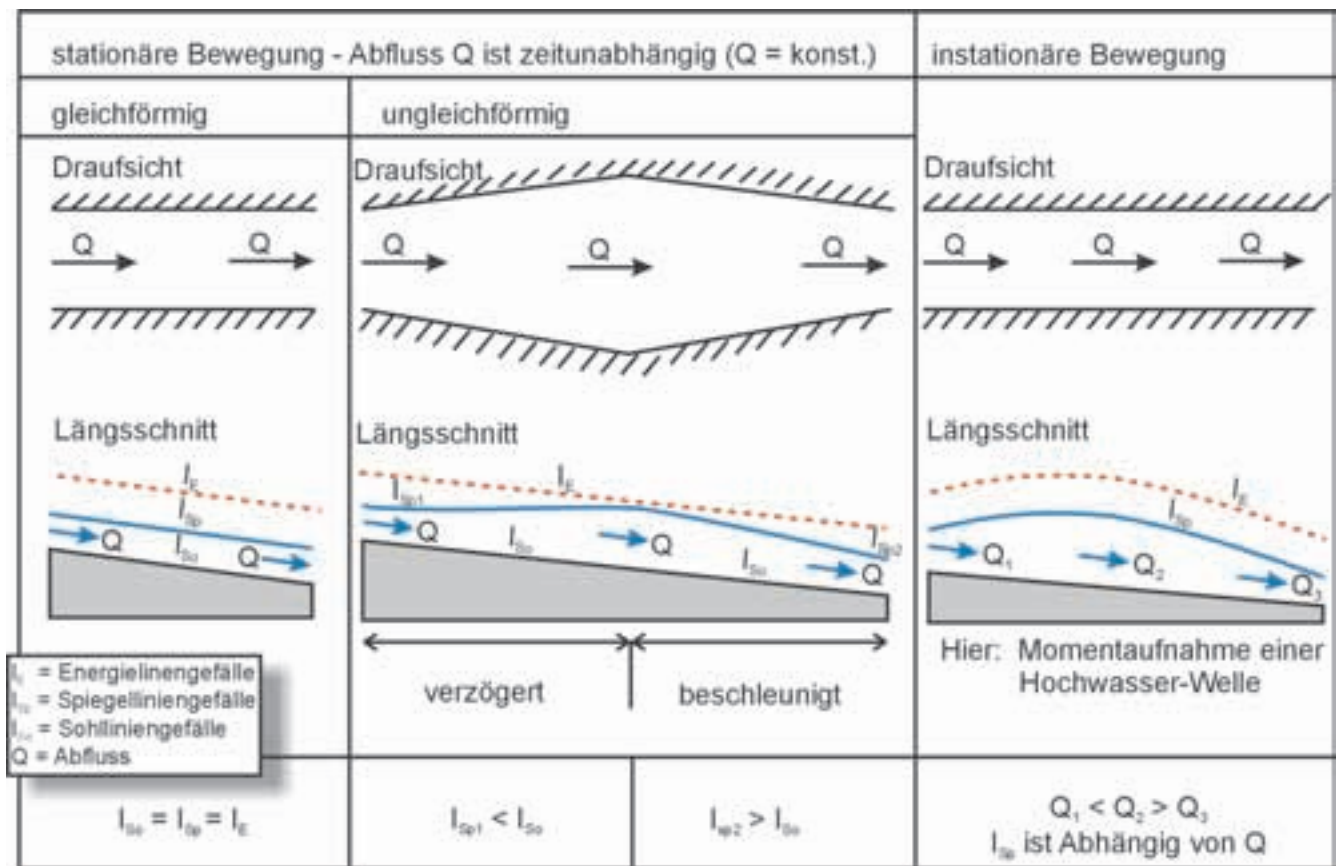


Abb. 8: Bewegungsarten des Wassers in einem offenen Gerinne. Verändert nach [9]

Zur Beschreibung der Flüssigkeitsbewegung werden folgende Begriffe definiert:

**Stromlinie:**

Linie, die an jeder Stelle der Flüssigkeit in Richtung der dort herrschenden Geschwindigkeit verläuft. Stromlinien können sich nicht schneiden, weil am Schnittpunkt zwei Geschwindigkeiten sein müssten [1].

**Stromröhre:**

Die Stromröhre wird durch ein Bündel von Stromlinien gebildet.

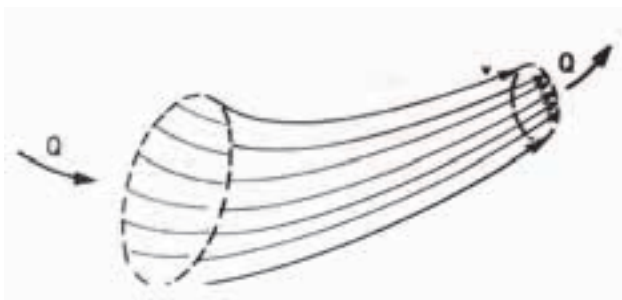


Abb. 9: Stromröhre, verändert nach [1]

Nach DIN 4044, 1980-7 [15] werden u.a. folgende Bewegungsarten des Wassers im Gerinne unterschieden:

Beim **Fließen** bewegt sich die Flüssigkeit auf fester Sohle und innerhalb fester Wandungen, unterteilt in

- a) **laminares Fließen:** Die Stromlinien verlaufen parallel,

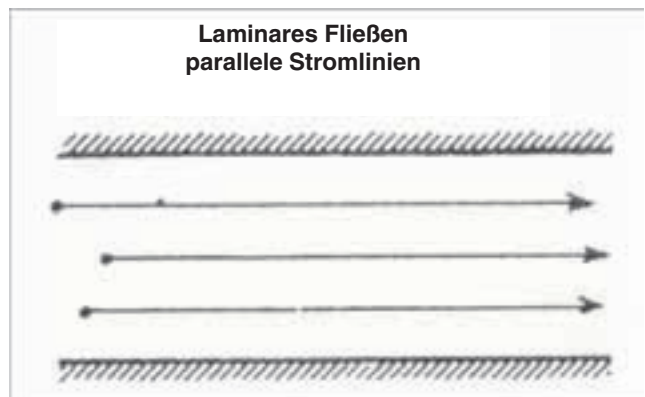


Abb. 10: Stromlinien beim laminaren Fließvorgang.



b) **turbulentes Fließen**: Die Stromlinien verlaufen nicht parallel, sondern sie durchsetzen sich gegenseitig, ohne sich zu schneiden (übliche Bewegungsform des Wassers).

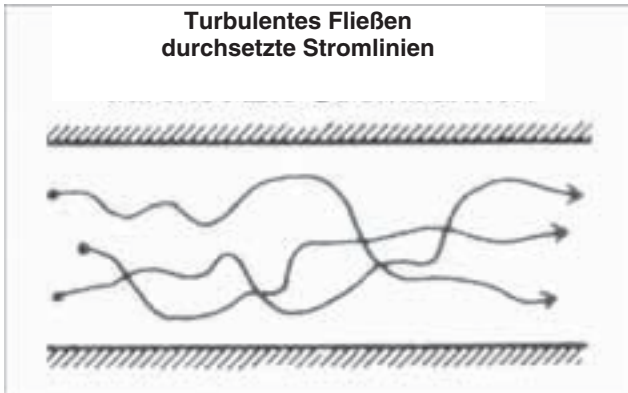


Abb. 11: Stromlinien beim turbulenten Fließvorgang.

Ferner charakterisiert man die Fließbewegung noch durch die Zustände **Strömen** und **Schießen**.

Die Grenze zwischen Strömen und Schießen liegt im offenen Gerinne dort, wo die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  gleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_{We}$  von Oberflächenwellen ist.

Letztere berechnet sich aus:

$$c_{We} = \sqrt{g \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

$c_{We}$ : Oberflächenwellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit in m/s

$g$ : Erdbeschleunigung in  $\text{m/s}^2$

$h$ : Wassertiefe in m

Als **Froude-Zahl** wird das Verhältnis von mittlerer Fließgeschwindigkeit  $v_m$  und Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $c_{We}$  bezeichnet:

$$Fr = \frac{v_m}{c_{We}} = \frac{v_m}{\sqrt{g \cdot h}} \quad [-] \quad (2)$$

$Fr$ : Froude-Zahl (dimensionslos)

$v_m$ : mittlere Fließgeschwindigkeit in m/s

$g$ : Erdbeschleunigung in  $\text{m/s}^2$

$h$ : Wassertiefe in m

Damit ist durch die Froude-Zahl eine Einteilung der Fließbewegung in Strömen oder Schießen möglich:

**$Fr < 1$  : strömender Abfluss**

**$Fr = 1$  : Grenzabfluss**

**$Fr > 1$  : schiessender Abfluss**

(3)

Des weiteren untergliedert man den Fließzustand in stationäre und instationäre Bewegungsarten.

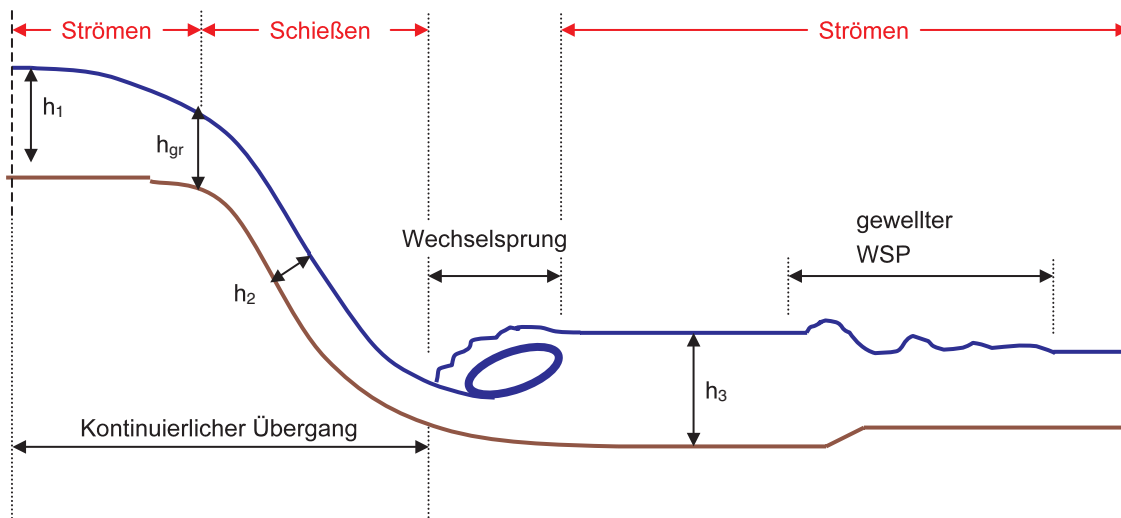


Abb. 12: Mögliche Verketzung von Fließzuständen in einem offenen Gerinne.

### Stationäre Bewegung:

Die Geschwindigkeit der Wasserteilchen in den einzelnen Punkten ist unabhängig von der Zeit. Damit herrscht im gleichen Querschnitt immer die gleiche Geschwindigkeit und der Abfluss ist konstant. Man unterteilt hierbei in

- a) **stationär-gleichförmige Bewegung.** Die Geschwindigkeit im gesamten Strömungsgebiet ist unabhängig von Zeit und Ort (z.B. Abfluss in einem künstlichen Gerinne mit konstantem Querschnitt und Sohlgefälle).



Abb. 13: Triebwerkskanal mit Trapezquerschnitt. Aufgrund der konstanten Gerinnegeometrie kann hier bei einer hydraulischen Berechnung von stationär-gleichförmigen Abflussbedingungen ausgegangen werden.

- b) **stationär-ungleichförmige Bewegung.** Die Fließgeschwindigkeiten an unterschiedlichen Orten des Strömungsgebietes sind verschieden (z.B. Abfluss in einem natürlichen Gerinne mit wechselndem Querschnitt).



Abb. 14: Gerinne mit örtlich wechselnden Fließgeschwindigkeiten. Hier liegt eine stationär-ungleichförmige Bewegung vor.

### Instationäre Bewegung:

Die Geschwindigkeit ist an verschiedenen Orten des Strömungsgebietes zeitlich verändert (z.B. Ausfluss aus einem Staubecken bei fallendem Wasserspiegel im Becken, Schwall- und Sunkwellen in Triebwerkskanälen, Ablauf von Hochwasserwellen in Gerinneabschnitten).



Abb. 15: Ausfluss aus einem Becken. Je weiter der Beckenwasserstand fällt, desto geringer wird auch die Fließgeschwindigkeit und der Wasserstand unterhalb des Auslaufes.

Alle möglichen Bewegungsarten sind tabellarisch in der eingangs aufgeführten Abb. 7, allgemein und speziell für offene Gerinne in Abb. 8 dargestellt.

### 2.2 Kontinuitätsgleichung

Das Kontinuitätsgesetz gilt als Massenerhaltungssatz bei Flüssigkeitsströmungen. Die Herleitung der Kontinuitätsgleichung bei eindimensionaler Betrachtungsweise kann über die Stromröhrentheorie oder nach der Betrachtungsweise von SAINT-VENANT erfolgen. Näheres dazu ist in einschlägiger Fachliteratur nachzulesen [3], [6].

Für Flüssigkeiten ist unter der Voraussetzung, dass sich die Querschnittsflächen  $A_i$  mit der Zeit nicht ändern und dass seitlich weder etwas zu- noch abströmt (stationäre Bedingungen), das Produkt aus Querschnittsfläche und mittlerer Geschwindigkeit für alle Querschnittsflächen  $A_i$  gleich groß [3].

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = \dot{Q} = v_i \cdot A_i \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4)$$

- Q: Abfluss im betrachteten Querschnitt in  $\text{m}^3/\text{s}$
- $v_i$ : mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt  $A_i$  in  $\text{m/s}$
- $A_i$ : durchflossene Querschnittsfläche in  $\text{m}^2$

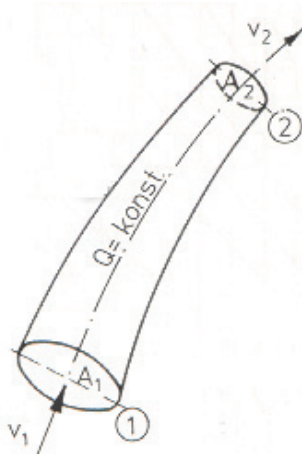


Abb. 16 (oben): Prinzip der Kontinuitätsbedingung anhand einer sich verjüngenden Stromröhre. Im Querschnitt  $A_1$  fließt eine Wassermenge  $Q$  mit einer mittleren Geschwindigkeit  $v_1$  in die Stromröhre ein. Im Querschnitt 2 tritt nach dem Kontinuitätssatz die gleiche Wassermenge  $Q$  wieder aus. Aufgrund der kleineren Querschnittsfläche  $A_2$  muss sich dort eine höhere mittlere Geschwindigkeit  $v_2$  einstellen.

Abb. 17 (rechts): Darstellung der einzelnen Summanden zur Berechnung der Energiehöhe einer Fließbewegung.

### 2.3 Energiegleichung nach BERNOULLI

Die Herleitung der Energiegleichung erfolgt über das dynamische Grundgesetz

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung.}$$

Durch Aufstellen einer Kräftebilanz an einem elementaren Flüssigkeitsteilchen erhält man zunächst die EULER'sche Gleichung für eindimensionale Strömung. Durch Annahme einer stationären Bewegung und Integration kann man dann die Energiegleichung für ideale, reibungsfreie Flüssigkeiten ableiten. Näheres dazu ist in einschlägiger Fachliteratur nachzulesen [2], [3], [6], [8], [12].

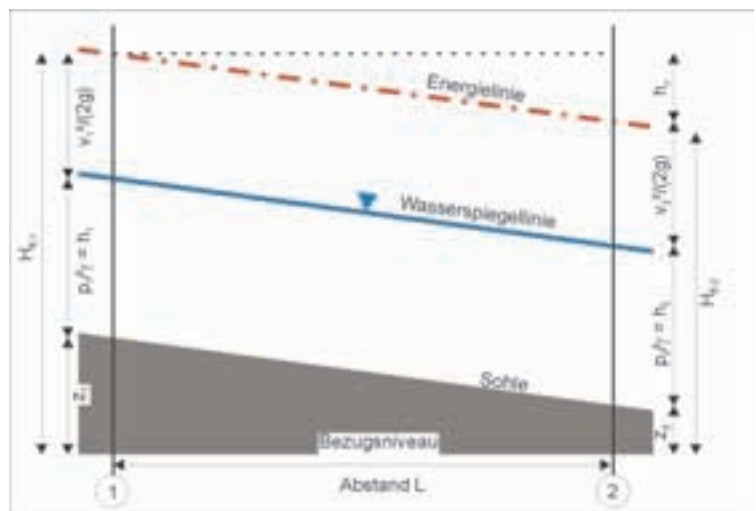
Die für die wasserbauliche Praxis geltende Gleichung von „Bernoulli“ für die stationäre Bewegung mit Reibungsverlust kann aus Abb. 17 abgeleitet werden.

$$H_{E,1} = H_{E,2} + h_v$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_v \quad (5)$$

- $H_{E,i}$ : Energiehöhe im Querschnitt  $i$  in m
- $z_i$  : Höhe über einem Bezugsniveau in m
- $p_i/\gamma$  : Druckhöhe in m mit  $\gamma = \rho \cdot g$
- $\rho$  : Dichte der Flüssigkeit in  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $g$  : Erdbeschleunigung in  $\text{m}/\text{s}^2$
- $v_i^2/2g$ : Geschwindigkeitshöhe im Querschnitt  $i$  in m
- $v_i$  : Fließgeschwindigkeit im Querschnitt  $i$  in  $\text{m}/\text{s}$
- $h_v$  : Verlusthöhe in m

Die Verlusthöhe  $h_v$  hat neben der inneren Reibung der Wasserteilchen untereinander verschiedene Ursachen (z.B. Reibung infolge der Sohlstruktur, Krümmung des Gerinneverlaufs, Querschnittsänderungen oder Reibung infolge Bewuchs).



## 2.4 Die allgemeine Fließformel

Im folgenden Abschnitt wird die Fließformel zur Berechnung des Abflusses in offenen Gerinnen für den stationären-gleichförmigen Fall (vgl. Abb. 7, Abb. 8 und 17) abgeleitet. Für die Abflussberechnung bei einer instationären bzw. extrem ungleichförmigen Situation wird auf Fachliteratur verwiesen [3], [6].

Für die hydraulische Berechnung eines Gewässerabschnittes wird eine mathematische Beziehung (Fließformel) benötigt. Diese gibt den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Abfluss  $Q$  und der Wassertiefe  $h$  wieder:

**$Q = f$  (mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$ , Wassertiefe  $h$ , Querschnittsform und -größe  $A$ , benetzter Umfang  $I_U$ , Sohlgefälle  $I_{So}$ , Gerinnewand- und Sohlbeschaffenheit bzw. -rauheit,...)**

Der grafische Zusammenhang zwischen  $Q$  und  $h$  wird als Abflusskurve (Abb. 18) bezeichnet.

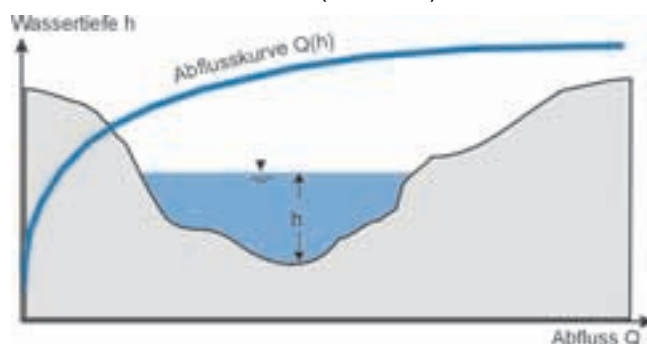


Abb. 18: Beispiel einer Abflusskurve. Mit zunehmender Wassertiefe  $h$  (im Diagramm auf der Ordinate abgetragen) vergrößert sich u.a. die durchflossene Querschnittsfläche  $A$ . Nach der Kontinuitätsgleichung  $Q = v \cdot A$  nimmt der Abfluss zu (im Diagramm auf der Abszisse abgetragen).

Die Herleitung der allgemeinen Fließformel erfolgt durch die Betrachtung eines geometrisch gleichbleibenden Gerinneabschnitts.

Die Formel wurde erstmals 1753 von BRAHMS und unabhängig von ihm 1755 durch DE CHEZY in dieser Form abgeleitet [3].

Zunächst wird das Wasservolumen eines Gerinneabschnitts zwischen den beiden Querschnitten 1 und 2 betrachtet. Der Fließvorgang wird erzeugt durch die Hangabtriebskomponente der Gewichtskraft  $F_G$  des Wasservolumens zwischen Querschnitt 1 und 2 (siehe dazu Abb. 19).

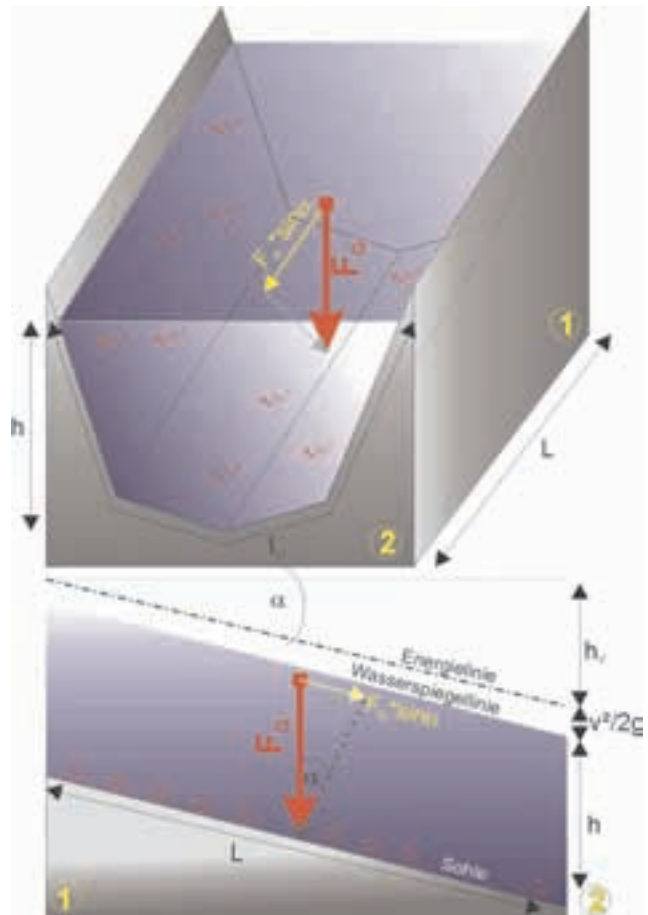


Abb. 19: Zur Herleitung der allgemeinen Fließformel.

Der obere Teil zeigt den Gerinneabschnitt zwischen Querschnitt 1 und 2 mit einem Wasservolumen. Das Gerinne hat in den Querschnitten 1 und 2 jeweils die durchflossene Fläche  $A$ . Das dazwischen befindliche Wasservolumen besitzt die Gewichtskraft  $F_G$ , die durch Zerlegen in zwei Komponenten die Hangabtriebskraft  $F_G \cdot \sin \alpha$  parallel zur Gerinnesohle besitzt.

Der untere Teil zeigt den Längsschnitt durch den oben dargestellten Gerinneabschnitt. Man erkennt die Annahme einer gleichförmig-stationären Strömung, da die Energie- und Wasserspiegellinie  $I_E$  parallel zur Sohlneigung  $I_{So}$  ist.

Die Hangabtriebskomponente berechnet sich aus folgender Beziehung:

$$F_G \cdot \sin \alpha = A \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad (6)$$

- $F_G$  : Gewichtskraft des Wasservolumens in N
- $F_G \cdot \sin \alpha$  : Hangabtriebskomponente von  $F_G$  in N
- $A$  : durchflossene Querschnittsfläche in  $\text{m}^2$
- $\rho$  : Dichte der Flüssigkeit in  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $g$  : Erdbeschleunigung in  $\text{m}/\text{s}^2$
- $L$  : Abstand der beiden Querschnitte in m
- $\alpha$  : Sohlneigungswinkel in  $^\circ$



Das mittlere Energieliniengefälle berechnet sich für kleine Sohlneigungswinkel näherungsweise zu:

$$I_E \approx \sin \alpha = \frac{h_v}{L} \quad [-] \quad (7)$$

$I_E$  :Energieliniengefälle in [-]  
 $\alpha$  :Sohlneigungswinkel in °  
 $h_v$  :Reibungsverlusthöhe in m  
 $L$  :Abstand zwischen Querschnitt 1 und 2 in m

setzt man nun (7) in (6) ein, so ergibt sich:

$$F_G \cdot \sin \alpha = A \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot h_v \quad [\text{N}] \quad (8)$$

Infolge des Fließvorganges tritt an den benetzten Gerinnewandungen eine Schubspannung  $\tau$  auf, die entlang der Strecke  $L$  eine der Hangabtriebskraft entgegenwirkende Reibungskraft  $F_R$  erzeugt. Die Schubspannung wird aus der Betrachtung von Rohrströmungen berechnet nach:

$$\tau = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (9)$$

$\tau$  :Schubspannung in N/m<sup>2</sup>  
 $\lambda$  :dimensionsloser (Rohrreibungs-)Beiwert  
 $\rho$  :Dichte der Flüssigkeit in kg/m<sup>3</sup>  
 $v$  :mittlere Fließgeschwindigkeit in m/s

Die Reibungskraft  $F_R$  berechnet sich aus der Multiplikation der Schubspannung mit der benetzten Gerinnefläche zwischen den Querschnitten 1 und 2:

$$F_R = \tau \cdot I_U \cdot L \\ = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot I_U \cdot L \quad [\text{N}] \quad (10)$$

$F_R$  :Reibungskraft in N  
 $\tau$  :Schubspannung in N/m<sup>2</sup>  
 $\rho$  :Dichte der Flüssigkeit in kg/m<sup>3</sup>  
 $v$  :mittlere Fließgeschwindigkeit in m/s  
 $I_U$  :benetzter Umfang in m  
 $L$  :Abstand zwischen Querschnitt 1 und 2 in m

Die Hangabtriebskomponente steht wegen des Energieerhaltungssatzes beim Fließvorgang mit der Reibungskraft im Gleichgewicht. Infolge dessen kann Gleichung (8) mit Gleichung (10) gleichgesetzt werden:

$$A \cdot \rho \cdot g \cdot h_v = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot I_U \cdot L \quad (11)$$

Diese Gleichung wird nun nach  $v$  aufgelöst:

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \cdot \sqrt{\frac{A}{I_U}} \cdot \sqrt{\frac{h_v}{L}} \quad [\text{m/s}] \quad (12)$$

Der erste Wurzelausdruck ist dimensionsbehaftet. Er wird als Geschwindigkeitsbeiwert  $C$  bezeichnet.

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad [\text{m}^{1/2}/\text{s}] \quad (13)$$

$C$  :Geschwindigkeitsbeiwert in m<sup>1/2</sup>/s  
 $g$  :Erdbeschleunigung in m/s<sup>2</sup>  
 $\lambda$  :dimensionsloser Reibungsbeiwert

Der Quotient aus durchflossener Fläche  $A$  und benetztem Umfang  $I_U$  wird als hydraulischer Radius  $r_{hy}$  bezeichnet.

$$r_{hy} = \frac{A}{I_U} \quad [\text{m}] \quad (14)$$

$r_{hy}$  :hydraulischer Radius in m  
 $A$  :durchflossene Querschnittsfläche in m<sup>2</sup>  
 $I_U$  :benetzter Umfang in m

Er ist eine wichtige charakteristische Länge, die den Gerinnequerschnitt kennzeichnet.

Der Quotient  $h_v/L$  entspricht nach Gleichung (7) dem Energieliniengefälle  $I_E$ . Damit erhält man durch Einsetzen von (7), (13) und (14) in Gleichung (12) die klassische Fließformel:

$$v = C \cdot \sqrt{r_{hy} \cdot I_E} \quad [\text{m/s}] \quad (15)$$

$v$  :mittlere Fließgeschwindigkeit in m/s  
 $C$  :Geschwindigkeitsbeiwert in m<sup>1/2</sup>/s  
 $r_{hy}$  :hydraulischer Radius in m  
 $I_E$  :Energieliniengefälle (= Sohlneigungswinkel  $I_{s0}$  bei gleichförmigen Abflussbedingungen)

Der Geschwindigkeitsbeiwert  $C$  wurde aufgrund seiner Herkunft stets als beschreibender Beiwert für die Wandrauheit betrachtet.

Im Folgenden sollen nun die Mängel der klassischen Fließformel aufgezeigt werden:

- Die Berechnung der Schubspannung  $\tau$  stammt von der Betrachtung vollturbulenter Rohrströmungen mit hydraulisch rauhem Verhalten ab. Bei offenen Gerinnen ist dieses Verhalten nicht immer gegeben, so dass die Proportionalität  $\tau \sim v^2$  aus Gleichung (9) nicht immer voll zutreffend ist.
- Die „innere Reibung“ des Wasserkörpers infolge der Viskosität (Zähigkeit) bleibt bei dieser Ableitung völlig unberücksichtigt. Sie spielt aber z.B. bei sehr glatten Gerinnen eine entscheidende Rolle.



- Die in Gleichung (15) berechnete Fließgeschwindigkeit  $v$  ist die mittlere Fließgeschwindigkeit. Der Einfluss der Gerinnegeometrie auf die reale Geschwindigkeitsverteilung kann aber in Gleichung (14) durch den hydraulischen Radius nicht ausreichend erfasst werden. Abb. 20 zeigt beispielsweise die gemessene Verteilung der Fließgeschwindigkeiten bei verschiedenen Gerinnegeometrien.
- Der Geschwindigkeitsbeiwert  $C$  ist dimensionsbehaftet. Er ändert sich (selbst bei gleichbleibender Wandbeschaffenheit entlang des benetzten Umfanges  $U$ ) mit der Wassertiefe  $h$  bzw. mit dem hydraulischen Radius  $r_{hy}$  sowie mit dem Sohlgefälle  $I_{so}$ .

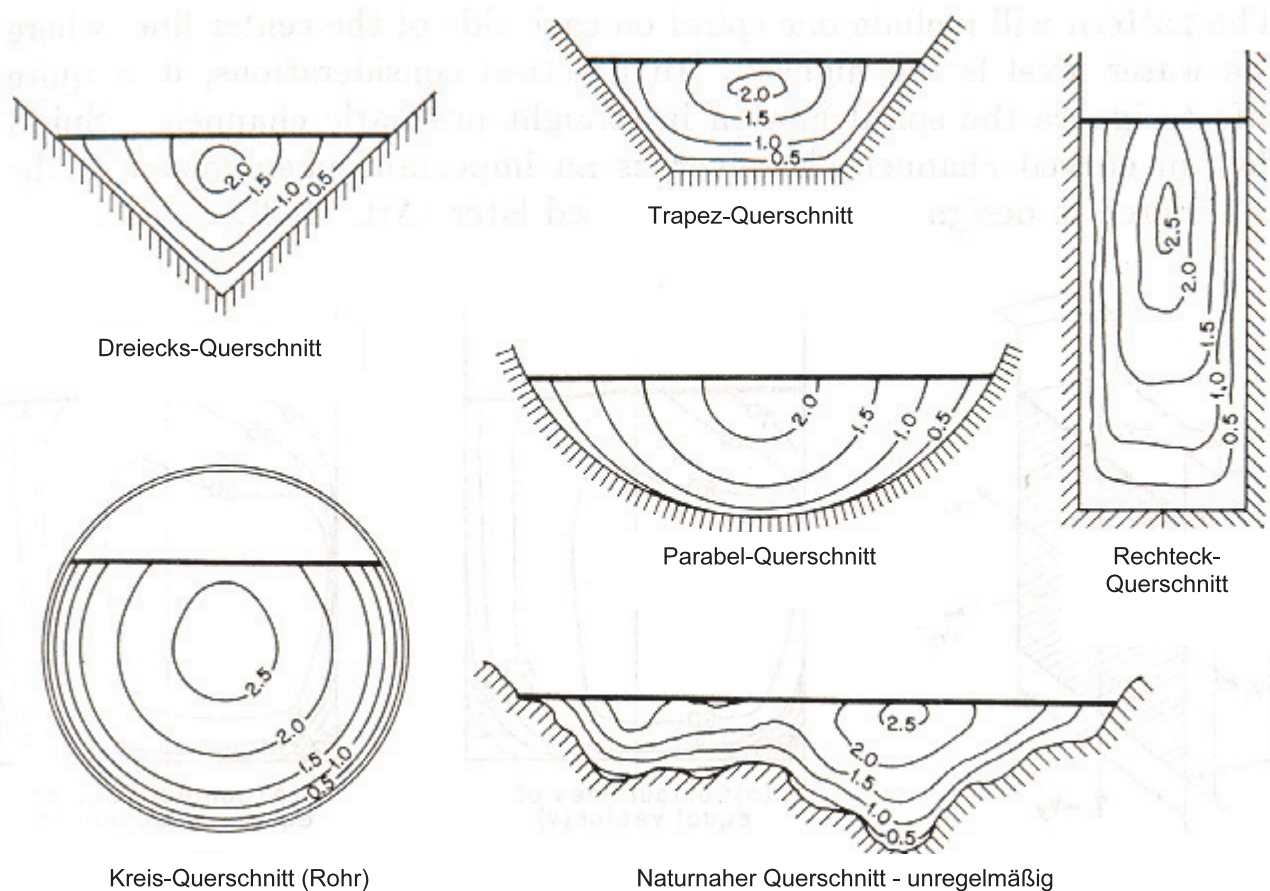


Abb. 20: Schematische Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung im Trapez- und Halbkreisprofil, verändert nach [8]. Mit Isotachen (Linien gleicher Geschwindigkeit) wird die Geschwindigkeit im Querschnitt dokumentiert.

## 2.5 Die empirische Fließformel nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER (GMS-Formel)

Um die in Kapitel 2.4 aufgezeigten Mängel der allgemeinen Fließformel zu beheben, entwickelte man in der Vergangenheit zahlreiche empirische Ansätze zur Berechnung des Geschwindigkeitsbeiwertes  $C$ . Es entstanden teilweise Formeln mit kompliziertem Aufbau, die sich in der praktischen Anwendung nicht durchsetzen konnten.

GAUCKLER-MANNING-STRICKLER leiteten unabhängig voneinander folgende Formel zur Bestimmung des Geschwindigkeitsbeiwertes  $C$  her:

$$C = \frac{1}{n} \cdot r_{hy}^{1/6} = k_{st} \cdot r_{hy}^{1/6} \quad (16)$$

$C$  : Geschwindigkeitsbeiwert in  $m^{1/2}/s$   
 $n$  : MANNING-Beiwert in  $s/(m^{1/3})$   
 $r_{hy}$  : hydraulischer Radius in  $m$   
 $k_{st}$  : STRICKLER-Beiwert in  $m^{1/3}/s$

Hierbei sind der STRICKLER-Beiwert  $k_{st}$  bzw. der in englischsprachiger Literatur oft verwendete Kehrwert (MANNING-Beiwert  $n$ ) dimensionsbehaftet und als Rauheitsbeiwerte anzusehen, die unabhängig vom hydraulischen Radius  $r_{hy}$  eingesetzt werden.

In der Schreibweise der Gleichung (15) erhält man die heute weit verbreitete Fließformel von **GAUCKLER-MANNING-STRICKLER (GMS-Formel)** zur Berechnung von Fließgeschwindigkeiten und Abflüssen in Gerinnen:

$$v = k_{st} \cdot \sqrt{I_E} \cdot r_{hy}^{2/3} \quad (17)$$

$$Q = v \cdot A = k_{st} \cdot \sqrt{I_E} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot A$$

$v$  : mittlere Fließgeschwindigkeit in  $m/s$   
 $k_{st}$  : STRICKLER-Beiwert in  $m^{1/3}/s$   
 $I_E$  : Energieliniengefälle  
 $r_{hy}$  : hydraulischer Radius in  $m$   
 $Q$  : Abfluss in  $m^3/s$   
 $A$  : durchflossene Querschnittsfläche in  $m^2$

Die GMS-Formel ist sehr einfach zu handhaben und wird in vielen Fällen zur Berechnung von Wasserspiegellagen in offenen Gerinnen angewandt.

Der STRICKLER-Beiwert ist direkt proportional zur Fließgeschwindigkeit  $v$  bzw. zum Abfluss  $Q$  und

beeinflusst somit das Rechenergebnis maßgeblich. Das Arbeiten mit der GMS-Formel setzt daher die möglichst exakte Kenntnis des STRICKLER-Beiwertes voraus.

Bei praktischen Berechnungen ist man jedoch oftmals gezwungen, einen für die Gerinnerauheit genügend genauen STRICKLER-Beiwert abzuschätzen.

Im Folgenden werden einige wichtige Eigenschaften des STRICKLER-Beiwertes aufgezeigt:

- Der STRICKLER-Beiwert beschreibt eine gleichmäßige Wandrauheit in einem kompakten geraden Gerinne. Dabei ist es grundsätzlich unerheblich, welche Größe der Abflussquerschnitt hat. Somit ist beispielsweise der  $k_{st}$ -Wert bei gleicher Oberflächenstruktur am Rhein ebenso groß wie an einem kleinen Bach.
- Der STRICKLER-Beiwert ist ein hydraulisch äquivalentes Rauheitsmaß und kein messtechnisch erfassbarer Wert.
- Aufgrund der linearen Abhängigkeit zwischen Fließgeschwindigkeit und STRICKLER-Beiwert ist bei gleichbleibender Geometrie die Fließgeschwindigkeit bzw. der STRICKLER-Beiwert um so größer, je glatter und regelmäßiger das Gewässerbett ist.

Aus den Eigenschaften ist ersichtlich, dass die Annahme des Rauheitsbeiwertes im Hinblick auf das Ergebnis einer hydraulischen Berechnung mit der GMS-Formel eine wesentliche Rolle spielt.

Daher wird vor allem bei natürlichen Gerinnen empfohlen, den  $k_{st}$ -Wert aus einer eingemessenen Wasserspiegellinie bei bekanntem Abfluss  $Q$  zu ermitteln. Beispielsweise kann dafür eine eingemessene Geschwemmsellinie bei einem mit Abflusswerten belegten Hochwasserereignis verwendet werden.

Ist eine direkte Ermittlung des  $k_{st}$ -Wertes durch hydraulische Berechnung (sog. Eichung) nicht möglich, so wird der  $k_{st}$ -Wert in Anlehnung an ähnliche, bereits durchgeführte und in der Natur überprüfte Berechnungen gewählt.

### 3. Literaturangaben für den STRICKLER-Beiwert $k_{st}$

Aus Erfahrungen, die auf Naturmessungen basieren, hat die Literatur STRICKLER-Beiwerte, die eine Zuordnung zur Gerinnebeschaffenheit ermöglichen, veröffentlicht. In der folgenden tabellarischen Übersicht sind einige dieser Literaturwerte zusammengestellt.

Gerinnecharakteristik	$k_{st}$ -Wert in $m^{1/3}/s$	Literaturquelle	Jahr
<b>Natürliche Flüsse</b>			
Fluss, reich an grobkörnigen Geschiebe	28 bis 30	RÖSSERT [2]	1994
Fluss, verkrautet	30 bis 35	RÖSSERT [2]	1994
Gebirgsfluss mit starker Geschiebeführung, unregelmäßiges Geröll	< 20	BOLLRICH [3]	1996
Gebirgsflüsse mit grobem Geröll	25	BOLLRICH [3]	1996
Natürliche Flussbetten mit fester Sohle, ohne Unregelmäßigkeiten	40	ZUPPKE [1]	1992
		LANGE/LECHER [4]	1993
		NAUDASCHER [6]	1992
		SCHRÖDER ET AL. [9]	1994
	40 bis 42	RÖSSERT [2]	1994
Natürliche Flussbetten mit Geröll und Unregelmäßigkeiten	28 bis 30	ZUPPKE [1]	1992
	30	RÖSSERT [2]	1994
		BOLLRICH [3]	1996
		LANGE/LECHER [4]	1993
		NAUDASCHER [6]	1992
	SCHRÖDER ET AL. [9]	1994	
Natürliche Flussbetten mit mäßigem Geschiebetrieb	33 bis 35	ZUPPKE [1]	1992
		LANGE/LECHER [4]	1993
		NAUDASCHER [6]	1992
		SCHRÖDER ET AL. [9]	1994
	35 bis 38	RÖSSERT [2]	1994
Natürliche Flussbetten mit starker Geschiebeführung	30	BOLLRICH [3]	1996
	28	LANGE/LECHER [4]	1993
		NAUDASCHER [6]	1992
		SCHRÖDER ET AL. [9]	1994
Natürliche Flussbetten, Ufer verkrautet	30 bis 35	SCHRÖDER ET AL. [9]	1994
Natürliche Flussbetten, verkrautet	30 bis 35	LANGE/LECHER [4]	1993
		NAUDASCHER [6]	1992
Wildbach	< 20	BOLLRICH [3]	1996
Wildbach mit grobem Geröll, Geschiebe in Bewegung	19 bis 22	RÖSSERT [2]	1994
		BOLLRICH [3]	1996
		LANGE/LECHER [4]	1993
		NAUDASCHER [6]	1992
		SCHRÖDER ET AL. [9]	1994
Wildbach mit grobem Geröll, ruhendes Geschiebe	25 bis 28	RÖSSERT [2]	1994
		LANGE/LECHER [4]	1993
		NAUDASCHER [6]	1992
		SCHRÖDER ET AL. [9]	1994
Wildbach mit starkem Geschiebetrieb	< 20	BOLLRICH [3]	1996

Gerinnecharakteristik	$k_{st}$ -Wert in $m^{1/3}/s$	Literaturquelle	Jahr
<b>Vorländer</b>			
Flussvorland mit Vegetation	30	BOLLRICH [3]	1996
unebenes, bewachsenes Vorland	15 bis 25	SCHRÖDER ET AL. [9]	1994
Vorland, je nach Bewuchs	20 bis 25	RÖSSERT [2]	1994
<b>Kanäle und künstliche Gerinne</b>			
Betonkanäle mit Glattverputz	90 bis 95	ZUPPKE [1] RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6]	1992 1994 1993 1992
	85 bis 90	BOLLRICH [3]	1996
Betonkanäle mit Zementglattstrich	100	ZUPPKE [1] RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9]	1992 1994 1993 1992 1994
	60 bis 65 60	RÖSSERT [2] BOLLRICH [3] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6]	1994 1996 1993 1992
Betonkanäle, fugenlose Holzschalung	70 bis 75	BOLLRICH [3]	1996
Betonkanäle, geglätteter Beton	90	RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9]	1994 1993 1992 1994
	85 bis 90	BOLLRICH [3]	1996
Betonkanäle, grobe Auskleidung	55	ZUPPKE [1] NAUDASCHER [6]	1992 1992
Betonkanäle, grober Beton	55	RÖSSERT [2]	1994
	50 bis 55	SCHRÖDER ET AL. [9]	1994
Betonkanäle, gute Holzschalung, gut verputzt	80 bis 90	RÖSSERT [2] NAUDASCHER [6]	1994 1992
	80	BOLLRICH [3]	1996
Betonkanäle, Holzverschalung, ohne Verputz	65 bis 70	ZUPPKE [1] RÖSSERT [2] BOLLRICH [3] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9]	1992 1994 1996 1993 1992 1994
	90 bis 100	RÖSSERT [2]	1994
Betonkanäle, Stahl- oder Vakuumschalung, fugenlos, sorgfältig geglättet	90 bis 100	BOLLRICH [3] LANGE/LECHER [4] SCHRÖDER ET AL. [9]	1996 1993 1994
Betonkanäle, ungleichmäßige Betonflächen	50	RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6]	1994 1993 1992

Gerinnecharakteristik	$k_{st}$ -Wert in $m^{1/3}/s$	Literaturquelle	Jahr
Erdkanäle aus Feinkies	40	RÖSSERT [2] BOLLRICH [3]	1994 1996
Erdkanäle aus Grobkies	35	RÖSSERT [2] BOLLRICH [3]	1994 1996
Erdkanäle aus Sand, Lehm, Kies – stark bewachsen	20 bis 26 20 bis 25	RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9]	1994 1993 1992 1994
Erdkanäle aus scholligem Lehm	30	RÖSSERT [2] BOLLRICH [3] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6]	1994 1996 1993 1992
Erdkanäle mit festem Material, glatt	50 bis 60 60  50	ZUPPKE [1] RÖSSERT [2] BOLLRICH [3] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9]	1992 1994 1996 1993 1992 1994
Erdkanäle mit groben Steinen ausgelegt	25 bis 30  26 bis 30 < 20	ZUPPKE [1] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9] RÖSSERT [2] BOLLRICH [3]	1992 1993 1992 1994 1994 1996
Erdkanäle mit mäßiger Geschiebeführung und Kolken	35	BOLLRICH [3]	1996
Erdkanäle mit Sohle aus Sand und Kies, gepflasterte Böschungen	45 bis 50	ZUPPKE [1] RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6]	1992 1994 1993 1992
Erdkanäle mit stärkster Verkrautung	< 20	BOLLRICH [3]	1996
Erdkanäle, Feinkies ca. 10 bis 30 mm	45  40 bis 45	LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9]	1993 1992 1994
Erdkanäle, fester Sand mit etwas Ton oder Schotter	50	RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6]	1994 1993 1992
Erdkanäle, Grobkies ca. 50 bis 150 mm	35	LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9]	1993 1992 1994
Erdkanäle, mittlerer Kies ca. 20 bis 60 mm	40	LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6]	1993 1992
Erdkanäle, stark bewachsen	25	BOLLRICH [3]	1996



Gerinnecharakteristik	$k_{st}$ -Wert in $m^{1/3}/s$	Literaturquelle	Jahr
Felskanäle, mittelgrob ausgebrochen	25 bis 30  < 20	RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9] BOLLRICH [3]	1994 1993 1992 1993 1996
Felskanäle, sehr grober Ausbruch	15 bis 20  < 20	RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9] BOLLRICH [3]	1994 1993 1992 1994 1996
Felskanäle, sorgfältig ausgesprengt	20 bis 25	RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6]	1994 1993 1992
Gemauerte Kanäle aus sorgfältigem Bruchsteinmauerwerk	70  65 bis 70	ZUPPKE [1] RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9] BOLLRICH [3]	1992 1994 1993 1992 1994 1996
Gemauerte Kanäle, Bruchsteine, grob behauen	50  60 50 bis 60	RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] BOLLRICH [3] SCHRÖDER ET AL. [9]	1994 1993 1992 1996 1994
Gemauerte Kanäle, Bruchsteinwände, Sohle aus Sand, Kies	45 bis 50	RÖSSERT [2] BOLLRICH [3] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9]	1994 1996 1992 1994
Gemauerte Kanäle, Hausteinquader	70 bis 80  70 bis 75	RÖSSERT [2] LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9] BOLLRICH [3]	1994 1993 1992 1994 1996
Gemauerte Kanäle, normales Bruchsteinmauerwerk	60	LANGE/LECHER [4] NAUDASCHER [6]	1993 1992
Gemauerte Kanäle, normales Mauerwerk	60  60 bis 70	RÖSSERT [2] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9]	1994 1992 1994
Gemauerte Kanäle, unverfugt, verputzt	60	BOLLRICH [3]	1996
Gemauerte Kanäle, Ziegelmauerwerk, gut gefugt	80	RÖSSERT [2] NAUDASCHER [6]	1994 1992
Werkkanäle mit Walzgussasphalt	70 bis 80 70 bis 75  70	ZUPPKE [1] RÖSSERT [2] NAUDASCHER [6] SCHRÖDER ET AL. [9] BOLLRICH [3]	1992 1994 1992 1994 1996
Werkkanäle aus Asphaltbeton	72 bis 77	SCHRÖDER ET AL. [9]	1994

## 4. Datengrundlagen

Für eine hydraulische Berechnung eines naturnahen Gewässerabschnittes ist vor Berechnungsbeginn eine sorgfältige Aufnahme der charakteristischen Gewässerdaten notwendig.

In diesem Kapitel werden die für eine empirische hydraulische Berechnung benötigten Datengrundlagen vorgestellt.

Zunächst wird dabei auf die **Erfassung der Querschnittsgeometrie** eingegangen. Dabei kommen verschiedene Aufnahmemöglichkeiten (von der vereinfachten- bis zur terrestrischen Vermessung) in Frage. Das Auswerten der aufgenommenen Querschnittsdaten (z.B. Berechnung der durchflossenen Querschnittsfläche) sowie die möglichen Darstellungsformen werden ebenfalls erklärt.

Um z.B. den Spitzenabfluss eines Hochwasserereignisses auszurechnen, ist die Lage der **Geschwemmsellinien und Hochwassermarken** von großer Bedeutung. Deshalb werden in einem weiteren Unterkapitel anhand vieler Bildbeispiele Geschwemmsellinien und Hochwassermarken aufgezeigt und charakterisiert.

Auch die Auswirkungen von **Bewuchselementen** entlang eines Gewässers müssen vor einer hydraulischen Berechnung abgeschätzt werden. In einem separaten Unterkapitel wird aufgezeigt, warum dies notwendig ist und wie man den Bewuchs relativ einfach erfassen und bei einer Berechnung berücksichtigen kann.

Die **Wahl von Rauheits- und Widerstandsbeiwerten** ist der zentrale Kern jeder hydraulischen Berechnung. Dabei spielt oftmals die Erfahrung des Anwenders sowie das angewandte Berechnungsverfahren für die Qualität der Ergebnisse eine entscheidende Rolle. In einem Unterkapitel wird hier noch einmal aufgezeigt, woher der Anwender Informationen über Rauheits- und Widerstandsbeiwerte beziehen kann.

Ferner werden im letzten Unterkapitel für eine empirische hydraulische Berechnung Arbeitshilfen (**Formblätter**) für eine schnelle und ausreichende Datenerfassung im Feldeinsatz vorgestellt.

### 4.1 Geometrie von Gewässer

- *Ausrüstungsgegenstände bei einer Begehung*

Bei der für eine hydraulische Berechnung eines Gewässerabschnittes unbedingt erforderlichen Ortsbegehung ist es sinnvoll, stets einige Ausrüstungsgegenstände parat zu haben.

Neben den Formblättern zur Erfassung der Querschnittscharakteristik (Kap. 4.5) empfiehlt es sich, ein Maßband, einen Fotoapparat und eventuell einen Neigungsmesser mitzuführen. Bei kleineren Gewässern kann ein Meterstab bereits ausreichend sein.

Das Fotografieren der Gewässerteilstrecke von mehreren Standpunkten aus ermöglicht es später, eventuelle Unklarheiten in Bezug auf die Gewässerumgebung zu beseitigen.

- *Wahl eines repräsentativen Querschnittes*

Zunächst muss man für jeden zu berechnenden Abschnitt einen repräsentativen Querschnitt festlegen. Dabei sollte neben der Geometrie auch auf Mäandrierung, Bewuchs, Bebauung und Gerinneinbauten geachtet werden.

- *Vermessen des Querschnittes*

Der aufzunehmende Querschnitt bildet die Senkrechte zur Flußachse und sollte über die örtlichen Uferlinien bzw. Flussbettbegrenzungen hinaus noch die überschwemmten Vorländer landeinwärts und evtl. vorhandene Flutmulden erfassen.

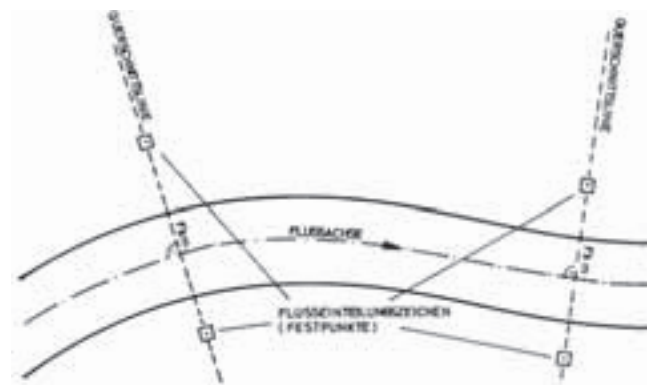


Abb. 21: Die aufzunehmenden Querschnitte müssen stets senkrecht zur Flußachse und Hauptströmungsrichtung liegen.

Stehen für den zu untersuchenden Querschnitt keine genauen aktuellen Vermessungsdaten zur Verfügung, kann mit Hilfe des Maßbandes bzw. Meterstabes die Gerinnegeometrie vereinfacht gemessen werden.

Die Verfahren und Möglichkeiten einer exakten Vermessung sollen an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden. Vielmehr wird hier auf den Leitfaden **Gewässergeometrie** [18] verwiesen. Hierin sind Verfahren aufgezählt und in Beispielen erläutert.

#### □ Grafische Darstellung des Querschnittes

Die grafische Darstellung der aufgenommenen Querschnittsdaten erfolgt nach dem oben erwähnten Leitfaden **Gewässergeometrie**. In jeder Darstellung müssen folgende Angaben enthalten sein:

- Gewässer- und Projektname
- Stationierung
- lokale Querprofillängen und –höhen
- Bezugshorizont in m+NN, Angabe Höhen-system
- Wasserspiegel mit Aufnahmedatum und -uhrzeit
- Kennzeichnung der örtlichen Vermarkung sowie Uferverbauung und –sicherung (falls vorhanden)
- Legende mit Maßstabsangabe, Verfasser und Bearbeitungsstand

#### □ Auswerten der Querschnittsdaten für eine empirische hydraulische Berechnung

Für eine empirische hydraulische Berechnung müssen die Werte der durchflossenen Querschnittsfläche  $A$ , des benetzten Umfanges  $U$  und evtl. der mittleren Wassertiefe  $h$  in Abhängigkeit einer Wasserspiegellage berechnet werden.

Auf der folgenden Seite ist in Form eines Verlaufsdigramms die Berechnung der oben genannten Querschnittswerte schrittweise angegeben.

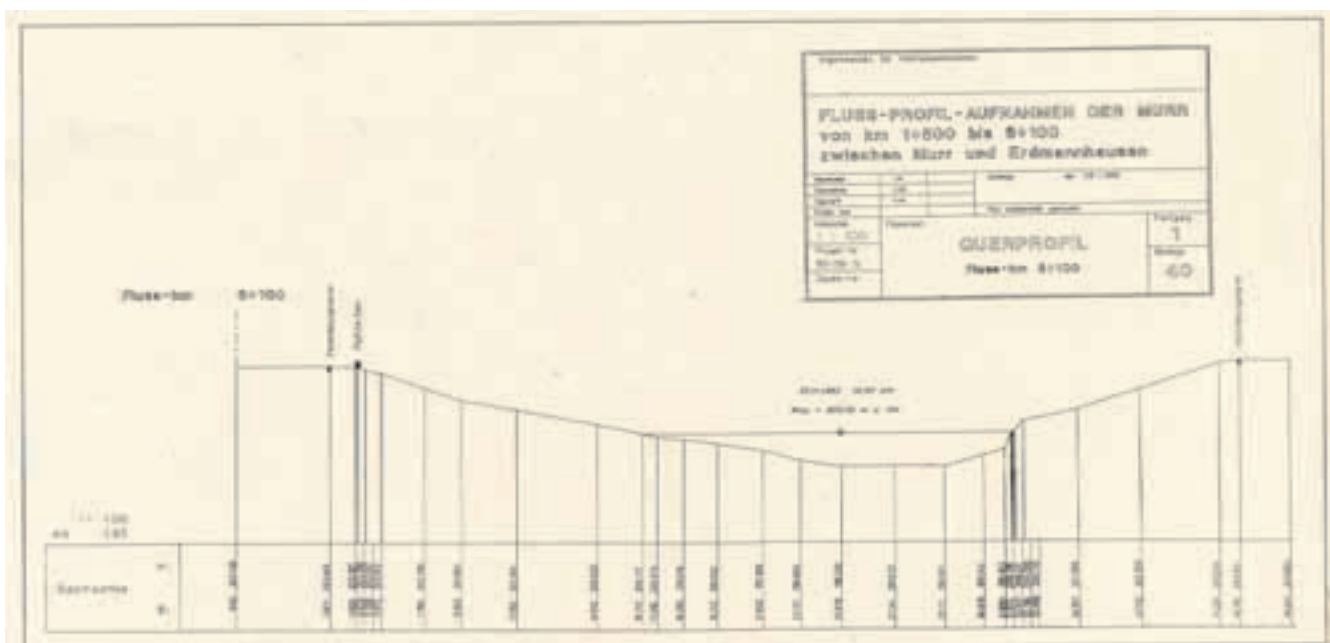
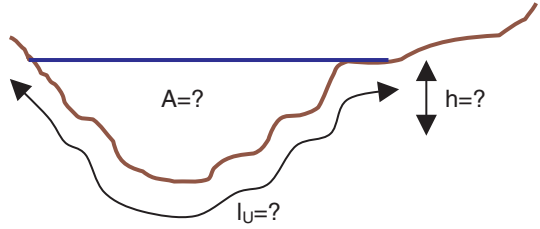


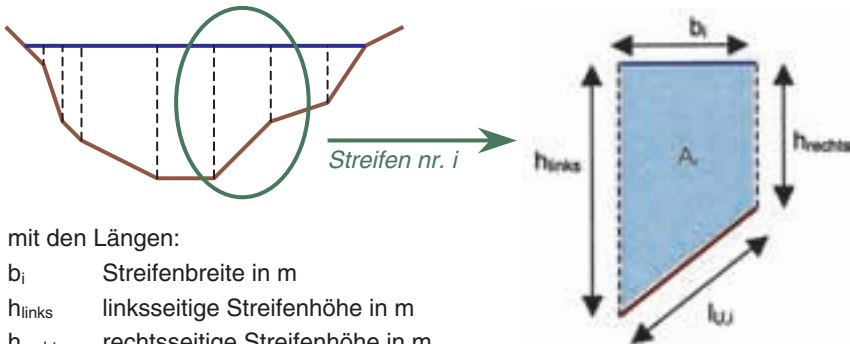
Abb. 22: Darstellung eines vermessenen Querschnittes.

**Vorgehensweise bei der Bestimmung der geometrischen Kenngrößen**  
 durchflossene **Querschnittsfläche A** in m<sup>2</sup>, **benetzter Umfang l<sub>U</sub>** in m und **mittlere Wassertiefe h** in m  
 in einem natürlichen Gerinne

**Ausgangssituation:**  
 Ein natürliches Gerinne wurde Vermessen und soll für eine hydraulische Berechnung herangezogen werden. Dazu wird nun für einen Wasserstand die durchflossene Querschnittsfläche **A**, die mittlere Wassertiefe **h** und der benetzte Umfang **l<sub>U</sub>** bestimmt.



**Aufteilen des Querschnittes in mehrere trapezförmige Streifen:**



mit den Längen:  
 b<sub>i</sub> Streifenbreite in m  
 h<sub>links</sub> linksseitige Streifenhöhe in m  
 h<sub>rechts</sub> rechtsseitige Streifenhöhe in m

**Berechnung der Streifenfläche (Trapezflächenformel) und des benetzten „Teilumfanges“ l<sub>U,i</sub>:**

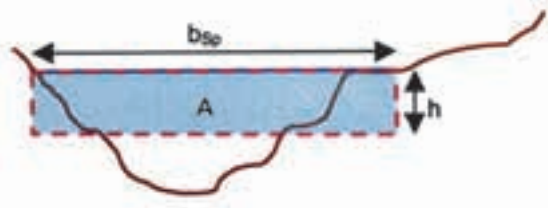
$$A_i = \frac{h_{links} + h_{rechts}}{2} \cdot b_i \text{ in m}^2$$

$$l_{U,i} = \sqrt{b_i^2 + (h_{links} - h_{rechts})^2} \text{ in m}$$

**Berechnung der Gesamtfläche A und des benetzten Umfangs l<sub>U</sub>:**

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \text{ in m}^2, \quad l_U = \sum_{i=1}^n l_{U,i} \text{ in m}$$

**Berechnung der mittleren Wassertiefe h durch Idealisierung des Querschnittes als Rechteckprofil:**



b<sub>sp</sub> Wasserspiegelbreite in m  
 A durchflossene Querschnittsfläche in m<sup>2</sup>, ermittelt nach obigem Schema

$$h = \frac{A}{b_{Sp}} \text{ in m}$$

h mittlere Wassertiefe in m (nach DIN 4044 2.1.32 [15])



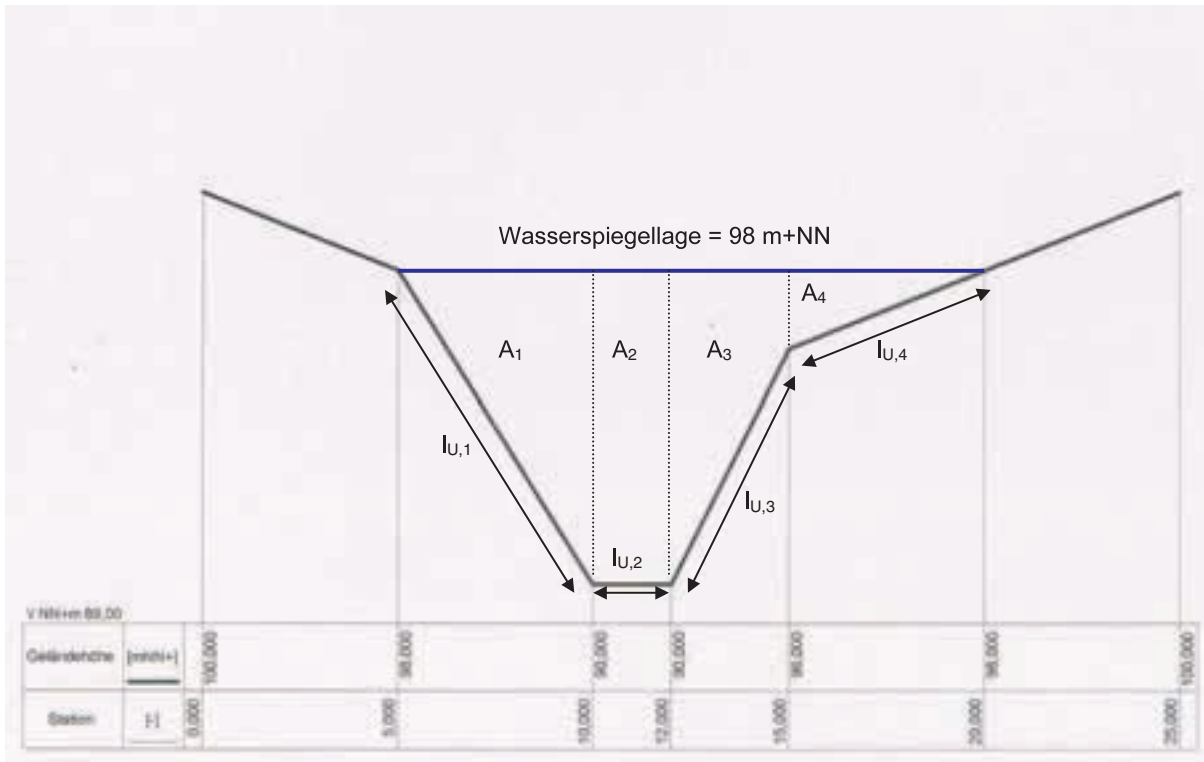


Abb. 23: Querschnitt zu Beispiel 1.

**Beispiel 1**

Ein Querschnitt wurde auf einfachste Weise vermessen. Bei der hier gezeigten grafischen Darstellung wurden bewusst einige inhaltliche Elemente weggelassen, damit die Flächenberechnung im Vordergrund steht.

Für einen Wasserstand von 98 m+NN sollen nun die charakteristischen Querschnittswerte durchflossene Querschnittsfläche A, benetzter Umfang  $l_U$  und mittlere Wassertiefe h berechnet werden.

Dazu wird das Verlaufsdiagramm angewandt. Man erhält folgende Ergebnisse (Bezeichnungen entsprechend dem Verlaufsdiagramm):

Nr.	$h_{links}$ (m)	$h_{rechts}$ (m)	$b_i$ (m)	$A_i$ (m <sup>2</sup> )	$l_{U,i}$ (m)
1	0,00	8,00	5,00	20,00	9,43
2	8,00	8,00	2,00	16,00	2,00
3	8,00	2,00	3,00	15,00	6,70
4	2,00	0,00	5,00	5,00	5,39
$\Sigma$			<b>15,00</b>	<b>56,00</b>	<b>23,52</b>

Abb. 24: Zur Berechnung von A und  $l_U$ .

Die mittlere Wassertiefe h wird aus der Idealisierung des Profiles als Rechteck abgeleitet und berechnet sich damit nach DIN 4044 [15] zu:

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{A}{b_{Sp}} \\
 &= \frac{56,00}{15,00} \\
 &= 3,73 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Aus diesem Beispiel wird ersichtlich, dass man mit Hilfe des Verlaufsdiagrammes bzw. durch Zerlegung der Querschnittsfläche in einfache geometrische Figuren (Rechteck, Dreieck und Trapez) die charakteristischen Querschnittswerte A,  $l_U$  und h einfach berechnen kann.

Eine Flächenberechnung kann auch mit Hilfe des Computers erfolgen.

## 4.2 Geschwemmsellinien und Hochwassermarken

Geschwemmsellinien und Hochwassermarken sind wichtige Grundlagen für die hydraulische Rekonstruktion von Hochwasserereignissen (Eichung hydraulischer Modelle) und die fachtechnische Abgrenzung von Überflutungsflächen.

### 4.2.1 Geschwemmsellinien

**Geschwemmsellinien sind Ablagerungen von Treibgut und Wasserinhaltsstoffen, welche die obere Grenze der Benetzung nach hohen Wasserständen anzeigen** (nach DIN 4049-3 [15]).

Die Geschwemmsellinie kann durch verschiedene Ablagerungs- oder Abtragungsprozesse entstehen. Einige Beispiele hierfür sind:

#### ❑ Niederlegen des Bewuchses

Bei großflächig überströmten Wiesenflächen kommt es im allgemeinen zu einem „umlegen“ des Bewuchses in Folge der angreifenden Strömungskräfte. Besonders bei längeren Grashalmen kann man sehr gut die zuletzt vorherrschende Strömungsrichtung erkennen, weil sich die langen Halme beim umlegen den Stromlinienverlauf anpassen.



Abb. 25: Infolge eines Hochwassers uferte der Bach auf die anliegende Wiese aus. Infolge der Strömungskräfte legte sich der Bewuchs in den überströmten Wiesenabschnitten um. Als blau-gestrichelte Linie ist u.a. die Ausuferungsgrenze zu erkennen.

#### ❑ Ablagerung von Laub

Bei überfluteten Flächen kommt es gerade in den Randbereichen aufgrund der kleineren Fließgeschwindigkeiten zu Ablagerungen von Schwebstoffen und Treibgut. Dabei bildet sich oftmals entlang der Randstromlinien eine sehr deutliche „Ablagerungslinie“ aus. Häufig bestehen solche Ablagerungen aus Laub, das im Oberlauf des Gewässers abgetragen worden ist.

#### ❑ Ablagerung von Ästen und Totholz

In bewaldeten Gebieten kommt es bei Ausuferungen zu enormen Ablagerungen von Totholz. Dabei ist oft eine Verkeilung eines einzelnen Totholzstückes zwischen Hindernissen (z.B. Bäume) ausschlaggebend. Weitere Äste und Geschwemmsel verfangen sich dann an der natürlichen Barriere und es entsteht eine lokale Ansammlung von Totholz und Geschwemmsel.



Abb. 26: Ablagerungen von Ästen zwischen Bäumen infolge eines Hochwassers.

#### □ Ablagerung von Unrat

Ähnlich wie bei der Ablagerung von Ästen und Totholz verhält es sich auch mit der Ablagerung von Unrat.



Abb. 27: Ablagerung von Unrat und Totholz an einer Bank entlang eines Weges, der parallel zum Gewässer verläuft. Die blau-gestrichelte Linie markiert den maximalen Wasserstand während des Hochwasserereignisses.

#### □ Ablagerung von feinsandigen Schwebstoffen

In jedem Gewässer befinden sich infolge erosiver Vorgänge suspendierte Stoffe (meistens Sohlsubstrat wie z.B. feinkörniger Sand). Die Dichte dieser feinkörnigen „Fracht“ im Gewässer nimmt besonders bei Hochwasserereignissen infolge der massiveren Erosionsvorgänge stark zu. In minderdurchströmten Bereichen kommt es dann infolge der geringeren Fließgeschwindigkeiten zu Sedimentationsprozessen.

Dabei ist gerade in gegliederten Gerinnen häufig zu beobachten, dass es zu Verlandungen oder auch Auflandungen in den Vorlandbereichen kommt.

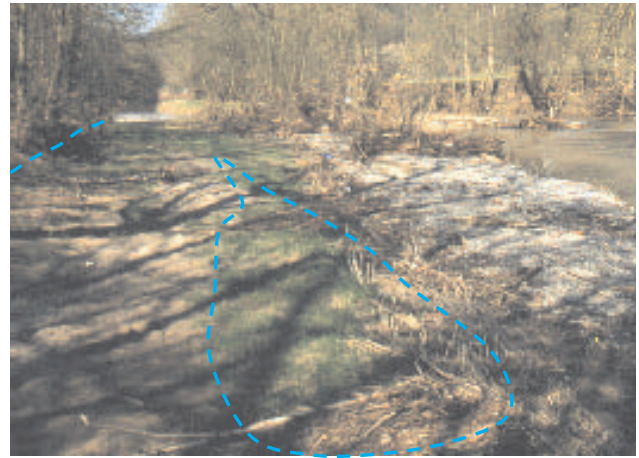


Abb. 28: Auf diesem Bild erkennt man sehr gut die Ablagerungen von feinsandigem Substrat auf dem mit Gras bewachsenen Vorland (linke Bildseite). Die blau-gestrichelte Linie bildet dabei den maximalen Wasserstand des Hochwasserereignisses nach. Ein etwas höher liegender Teil des Vorlandes wurde offensichtlich wie eine Insel umströmt.

#### □ Abtrag von im Gelände lagernden Laub und Grasschnitt

Oftmals kommt es infolge Ausuferungen auch zu einem Abtrag von Material auf den Vorländern.



Abb. 29: Infolge eines kleinen Hochwassers wurde in den überströmten Vorlandbereichen das dort liegende Laub abgetragen.

#### □ Abtrag von Boden

Bei extremen Hochwasserereignissen kann es infolge hoher Strömungskräfte zu Erosion kommen. Gerade in Bereichen von Verengungen und hinter Hindernissen (z.B. Bäume) entstehen dann Kolke und Uferabbrüche. Im Gegensatz dazu ist aber im Strömungsschatten von Hindernissen eine Auflandung zu beobachten.





Abb. 30: Abtrag von Boden durch einen Uferbruch während eines Hochwasserereignisses. Infolge des Baumes kam es zu einer lokalen Verengung des Abflussquerschnittes. Es fand eine Umströmung des Hindernisses statt, die aufgrund hoher Fließgeschwindigkeiten Erosion entlang der Uferböschung bewirkte. In den Ästen des Baumes hat sich Geschwemmsel abgelagert.

#### ❑ Verschmutzung an Bauwerken

Stehen bei einem Hochwasser infolge Ausuferungen Bauwerke im Wasser, so kann man nach dem Ereignis oftmals anhand der Verschmutzung den maximalen Wasserstand abschätzen.



Abb. 31: Anhand der Verschmutzung des Gebäudes kann man den maximalen Wasserstand eines Hochwassers ableiten.

#### ❑ Schäden an Bauwerken

Durch hohe Strömungskräfte (verursacht z.B. durch massive Beschleunigung des Wassers wegen lokaler Einengungen infolge von Bauwerken) können sogar betroffene Bauwerke (teilweise) zerstört werden.



Abb. 32: Infolge einer massiven Gewässereinengung durch Bebauung der Uferzonen kam es in diesem Fall bei einem extremen Hochwasser zu schweren Zerstörungen der angrenzenden Gebäude durch die hohen Strömungskräfte.

#### ❑ Schmelzen der Schneedecke bei Überflutung

Bei Hochwasserereignissen im Winter kann es zu einer (teilweisen) Abschmelzung von schneebedeckten Bereichen kommen.

### 4.2.2 Erfassen von Flutmulden und Geschwemmsellinien

Nach Ablauf des Hochwassers ist die Geschwemmsellinie an markanten und relevanten Punkten mit Pflöcken zu markieren.

**Zur Einmessung der Geschwemmsellinie im Gelände können zwei unterschiedliche Methoden angewendet werden. In freiem, bewuchsarmen Gelände kann die Geschwemmsellinie photogrammetrisch, im Bewuchs kann die Geschwemmsellinie nur terrestrisch bestimmt werden.**



Abb. 33: Aus einem Luftbild grob bestimmbare Geschwemmsellinie.



In Ausnahmefällen, in denen sich die Geschwemmsellinie durch eine eindeutige Erhebung im Gelände abzeichnet, kann die Erfassung auch durch Laserscanning erfolgen.



Abb. 34: Geschwemmsellinie auf einem Sportplatz, entstanden durch Ablagerung von feinkörnigem Material. Durch eindeutige topographische Erhebungen auf dem ebenen Platz ist die Erfassung mit Laser-scanning möglich.

In einem Gelände mit vielen eindeutigen Detailformen, das zudem dem Betrachter gut bekannt ist, kann es auch durchaus genügen, die Lage der Geschwemmsellinie vor Ort frei Hand in einen Höhenlinienplan einzuzeichnen, um die Information der Wasserstandslinie schnell und möglichst einfach zu erfassen.

Dieses Vorgehen ermöglicht das Ermitteln des Wasserstandes an einem beliebigen Punkt aus der Höhenlinieninformation der Grundrisskarte. Durch das Einzeichnen der Geschwemmsellinie ohne Einmessung ist natürlich mit einem Fehler zu rechnen, andererseits ist es nicht immer möglich, innerhalb der kurzen Zeit, in der die Geschwemmsellinie im Gelände sichtbar ist, eine Vermessung zu veranlassen; aus diesem Grund können fehlerbehaftete Daten ausreichend sein.

#### 4.2.3 Darstellen von Geschwemmsellinien

Geschwemmsellinien können als Lageinformation in einem Grundrissplan als Linien oder Farbflächen oder als Höheninformation in einem Längsschnitt dargestellt werden.

#### 4.2.4 Bewerten von Geschwemmsellinien

Die Geschwemmsellinie bildet den Höchstwasserstand ab, da:

- bei abschwelldem Hochwasser nicht mehr so viel Geschwemmsel im Gewässer mitgeführt wird, als dass Geschwemmsel in erheblichem Maße abgelagert wird;
- bei bewachsenem Ufer Geschwemmsel wie Blätter und Äste nicht über weite Strecken transportiert wird, sondern vielmehr nur auf dem höheren Ufer gesammelt abgelagert wird;
- die maximale Erosion bei der größten auftretenden Kraft, also beim Höchstwasserstand auftritt.

Die Problematik bei der Erfassung der Geschwemmsellinie ist die Zuordnung zum Höchstwasserstand.

Nur in den seltensten Fällen zeichnet sich die Geschwemmsellinie als eindeutige, scharfe Linie im Gelände ab, vielmehr ist meistens ein mehr oder weniger breites Band an Geschwemmsel zu erkennen. Die Breite dieses Bandes hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- der Geländeneigung (je steiler umso schmaler, je flacher umso breiter)
- dem Wellenschlag (verfälscht Breite und Höhenlage)
- dem Bewuchs (abflusshindernder Bewuchs fängt Geschwemmsel in hohem Maße und kann sich starker Strömung durch umlegen anpassen)

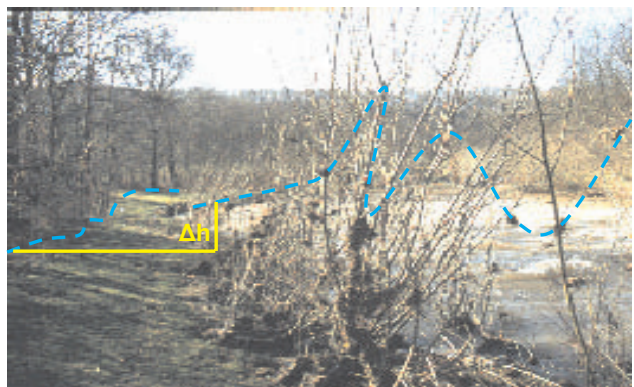


Abb.35: Höhenunterschied  $\Delta h$  zwischen Geschwemmsellinie durch Laubabtrag und Geschwemmsellinie durch absetzen von Laub in den Weiden, die sich beim erhöhten Wasserstand der Strömung angepasst und „umgelegt“ hatten.

Es ist zu klären, welchem Abschnitt der Geschwemmsellinie (Oberkante, Unterkante, unteres Drittel, ...) dem Höchstwasserstand zuzuordnen ist. Um eine eindeutige Höchstwas-

serstandslage zuzuordnen ist es daher hilfreich, im Bereich der Geschwemmsellinie eine eindeutige Höchstwasserstandsmarke (z.B. an einem Pegel) zu haben.

Ferner ist darauf zu achten, ob die Geschwemmsellinie die Energielinie oder die Strömungslinie wiedergibt. Hierzu sind hydraulische Auswirkungen von Bauwerken im Umfeld der Geschwemmsellinie zu berücksichtigen.

#### 4.2.5 Hochwassermarken

Hochwassermarken (HW-Marken) sind in der Örtlichkeit angebrachte Zeichen zur Markierung aufgetretener außergewöhnlich hoher Wasserstände



Abb.36: Hochwassermarke. Das Jahr des Hochwassers sollte jedoch vollständig angegeben werden (1990).

#### 4.2.6 Setzen und Einmessen von HW-Marken

Meist werden Tafeln aus Kunststoff, Metall oder Keramik gesetzt, es gibt jedoch auch Farb- oder Reliefmarkierungen auf Mauerwerk.

HW-Marken werden häufig von Dienststellen des Landes oder des Bundes gesetzt.

Bei der Bestimmung des Höchstwasserstandes ist darauf zu achten, dass kein Rückstau einfluss des Bauwerkes den Höchstwasserstand beeinflusst hat. Die hydraulische Auswirkung von Bauwerken auf den Wasserstand muss daher stets berücksichtigt werden.

Auf der HW-Marke muss das genaue Datum des Hochwassers vermerkt sein. Die HW-Marke ist

auf das amtliche Höhensystem einzumessen. Eine Lagemessung ist nicht notwendig, da die Zuordnung und auch die Darstellung in einem Katasterplan durch eine eindeutige Beschreibung möglich ist (z.B. Ort mit Straße und Hausnummer, Gewässer mit Station und Bauwerksnummer).



Abb.37: Hochwassermarken verschiedener Ereignisse. Die Ereignisse sind am jeweiligen Gewässer durchgehend einheitlich farblich gekennzeichnet.



### 4.3 Erfassen von Bewuchs

Die unterschiedlichen Verhältnisse an einem naturnahen Gewässer müssen über die Geometrie und Rauheit in der hydraulischen Berechnung berücksichtigt werden.

Ebenso müssen auch die Strömungen und der intensive Massen- und Impulsaustausch zwischen bewachsenen Bereichen und gehölzfreien Hauptgerinne sowie die abflussreduzierende Wirkung des Bewuchses in eine Berechnung mit einbezogen werden.

Daraus resultiert, dass der Bewuchs in seiner Ausdehnung und Struktur erfasst werden muss, um über den Rauheits-Beiwert  $k_{st}$  in die hydraulische Berechnung mit einzufließen.

Die Erhebung und Darstellung der Ergebnisse sollte schnell, einfach und nachvollziehbar sein. Bei der Berücksichtigung des Bewuchses in der hydraulischen Berechnung wird davon ausgegangen, dass krautige Pflanzen wie Gräser, Stauden und junger Röhricht dem fließenden Wasser nicht widerstehen, sondern von ihm niedergedrückt werden. Deshalb werden sie bei einer Berechnung durch eine glatte Rauheit berücksichtigt.

Damit sind jeweils nur Gehölze, also Bäume und Sträucher zu berücksichtigen. Sie müssen hinsichtlich ihrer Lage und Ausdehnung innerhalb des durchflossenen Querschnittes erfasst werden. Der DVWK unterscheidet Klein-, Mittel- und Großbewuchs (siehe Leitfaden, Teil 2 „Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen“, Kapitel 5, Fall 16).

Es kommt darauf an, ob der Bewuchs als geschlossener Bestand, d. h. als kompaktes Hindernis der Strömung entgegensteht und damit **umflossen** wird, oder ob die einzelnen Elemente des Bewuchses lückig stehen und **durchflossen** werden.

Die Erfahrung zeigt, dass Baum- und Strauchbestände mit Abständen kleiner als zwei Meter sich bei Hochwasser häufig durch Geschwemm- sel zusetzen. **Deshalb kann von einer Unterscheidung zwischen Um- und Durchströmbarkeit erst bei Bewuchsabständen größer als zwei Meter ausgegangen werden.** Bei kleineren Abständen längs oder quer zur Haupt-

strömungsrichtung sollte grundsätzlich die Annahme eines umflossenen kompakten Bewuchses getroffen werden. Die Abstände beziehen sich dabei auf die Kronen-Umrisse (ausgegangen vom größten im Abflussquerschnitt befindlichen Kronendurchmesser) bzw. bei astfreien hohen Stämmen von Stamm zu Stamm.



Abb. 38: Kompakte Bewuchsanordnung, die im Hochwasserfall umflossen wird und als vertikale „Trennwand“ den Querschnitt in Zonen verschiedener Fließgeschwindigkeiten unterteilt.



Abb. 39: Einzelne lückig stehende Bewuchselemente, die im Hochwasserfall durchflossen werden können.

Eine Anordnung des Bewuchses längs zur Fließrichtung kann als vertikale Trennwand wirken, die den Gewässerquerschnitt in einzelne Teilabschnitte mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten unterteilen kann.

In den Übergangszonen zwischen den einzelnen Bewuchsabschnitten treten verstärkt Wirbel mit Massen- und Impulsaustausch auf, welche die Hauptströmung bremsen oder ablenken können. Dies kann eine nach Segmenten getrennte Berechnung erforderlich machen.

Vor Beginn einer hydraulischen Untersuchung wird für die Gewässerteilstrecke ein repräsentativer Querschnitt festgelegt. In diesem Abschnitt sollte der Bewuchs relativ homogen sein.

#### 4.4 Rauheits- und Widerstandsbeiwerte

Die Wahl der Rauheits- und Widerstandsbeiwerte ist zentraler Bestandteil jeder hydraulischen Berechnung.

Je nach Berechnungsart lassen sich die Beiwerte messtechnisch erfassen oder können unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen übertragen werden.

Um den Anwender bei der Bestimmung der Beiwerte Erfahrungswerte geben zu können, sind im **Teil 3** des Leitfadens Rauheits- und Widerstandsbeiwerte dokumentiert.

Ferner kann man auf die in **Kapitel 3** aufgeführten Literaturwerte zurückgreifen, die größtenteils aus Versuchsreihen bestimmt wurden.

Oftmals besteht auch während der hydraulischen Berechnung die Möglichkeit, die Rauheits- oder Widerstandsbeiwerte zu eichen.

Kennt man z.B. bei einem Hochwasserereignis den Spitzenabfluss und die Lage einiger Hochwassermarken oder Geschwemmsellinien, so lässt sich durch eine „Rückrechnung“ mit der GMS-Formel der  $k_{st}$ -Wert berechnen. Dieser Vorgang ist gerade bei komplexen hydraulischen Modellen, bei denen mehrere Abflusszustände untersucht werden sollen, ein wichtiger Bestandteil für die Verbesserung der Qualität der Berechnungsergebnisse.

#### 4.5 Formblätter

In diesem Kapitel werden dem Benutzer Formblätter zur Erfassung der Daten für eine empirische hydraulische Berechnung zur Verfügung gestellt.

Die Formblätter sind möglichst einfach gegliedert und ermöglichen es dem Anwender direkt am Gewässer möglichst schnell und ausreichend genau die relevanten Daten zu erfassen.

Es empfiehlt sich, bei der Begehung stets neben einem Fotoapparat ein Maßband bzw. Meterstab mitzuführen. Des Weiteren sollte, falls vorhanden, ein Neigungsmesser im Taschenformat zur Anwendung kommen.

Auf den Formblättern soll stichwortartig und durch ankreuzen die Querschnittscharakteristik an den entsprechenden Stellen vermerkt werden. Dies soll beim Abschätzen der Rauheiten helfen. **Besonders sorgfältig sollte dabei die Sohlstruktur notiert werden, da diese auf Fotos oftmals nicht mehr zu erkennen ist.**

Ebenso sorgfältig müssen die Informationen über den Bewuchs dokumentiert werden. Hierfür sollten ebenfalls Fotos gemacht werden. Zusätzlich sollte man die hydraulisch relevanten Bewuchsumrisse in der Querschnittsskizze eintragen. Eine Abschätzung der Bewuchsquerschnitte wird ebenfalls empfohlen.

Auf den folgenden Seiten sind die Formblätter zur Erfassung der Querschnittscharakteristik dargestellt. In Kapitel sechs dieses Leitfadens sind in einem Beispiel ausgefüllte Formblätter abgedruckt.



**Skizze des Querschnitts mit eingetragenen Abmessungen**

Gewässer:

Datum / Uhrzeit:

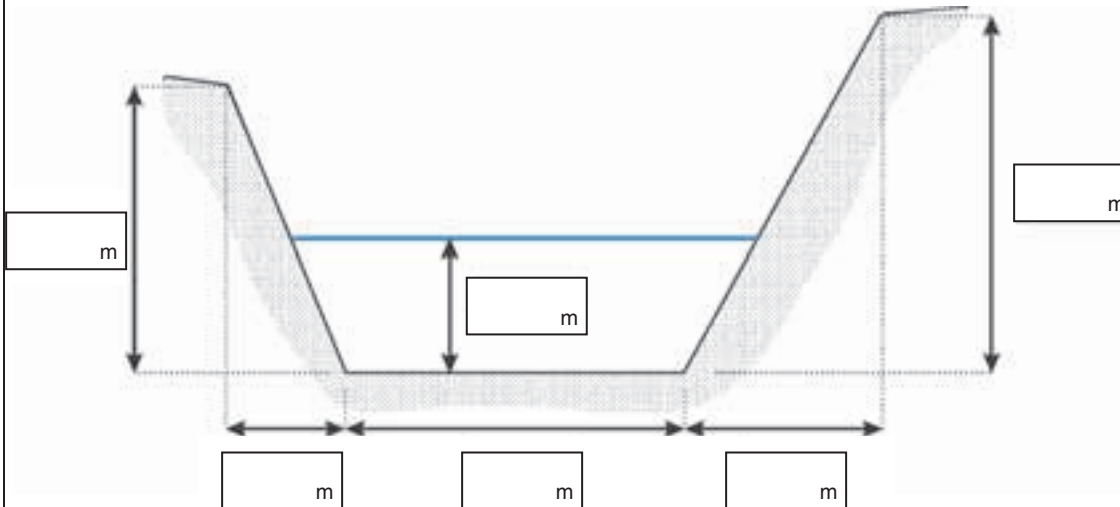
Ort / Stationierung:

Bearbeiter:

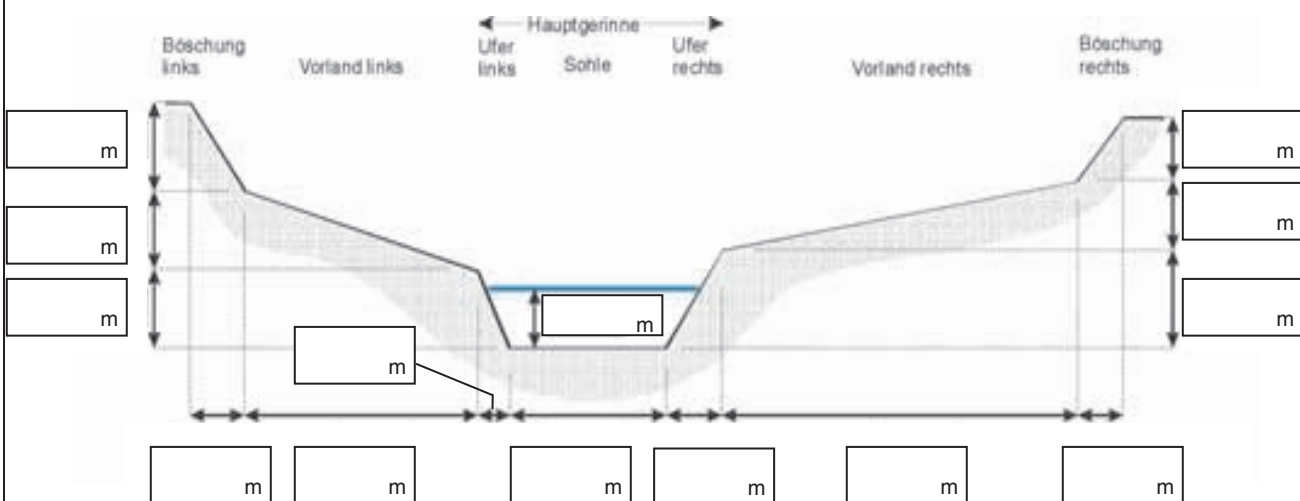
**Nicht maßstäbliche Querschnittsskizze für kompakte/gedielerte Gerinne**

Die relevanten Abmessungen sind in die Kästchen einzutragen. Bewuchselemente sollten skizziert werden.

Für kompakte Gerinne (Blick in Fließrichtung):



Für gedielerte Gerinne (Blick in Fließrichtung):



**Weitere Angaben:**

Wassertiefe h: Die Gerinnesohle ist idealisiert als horizontal anzunehmen. Die Wassertiefe ist an mehreren Stellen im Querschnitt zu messen und dann zu mitteln. Der gemittelte Wert wird dann in die Skizze eingetragen.

Fließgeschwindigkeit  $v_m$ : Die mittlere Fließgeschwindigkeit sollte auch geschätzt werden. Durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung  $Q = v_m \cdot A$  kann damit ein erster Näherungswert für den Abfluss berechnet werden.

Bewuchselemente: Bewuchs (Bäume, Sträucher, Büsche, Kraut, Gras) sollte mit in die Skizze eingetragen werden.

**Wahl der Teilrauheitsbeiwerte  $k_{st,i}$  zur Berechnung der äquivalenten Gerinnerrauheit  $k_{st,ges}$  nach EINSTEIN/HORTON (→Kap. 5.2.2)**

**1) Wahl der Sohlenrauheit  $k_{st,So}$  [ $m^{1/3}/s$ ]**

Beschreibung .....	$k_{st}$ -Wert	Wahl
• Sohle ohne Unregelmäßigkeiten ...		
...glatt (z.B. Feinkies $k_{st}$ ca. $40 m^{1/3}/s$ ).....	38 bis 42	<input type="checkbox"/>
...mit mäßigem Geschiebetrieb (stabile Deckschicht; z.B. Grobkies ca. $35 m^{1/3}/s$ ).....	33 bis 38	<input type="checkbox"/>
...reich an Geschiebe oder großen Steinen .....	25 bis 33	<input type="checkbox"/>
• Sohle mit Unregelmäßigkeiten (z.B. Becken, Sandbänke, unregelmäßige Sieblinie) ...		
...ohne signifikanten aquatischen Bewuchs .....	24 bis 30	<input type="checkbox"/>
...mit vereinzelt großen Steinen und Verkrautung.....	20 bis 28	<input type="checkbox"/>
...mit vermehrt großen Steinen .....	17 bis 22	<input type="checkbox"/>
...ausgeprägte Absturz-Becken-Struktur bzw. Stromschnellen und Verkrautung .....	13 bis 20	<input type="checkbox"/>

**Gewählte Sohlenrauheit:**  $k_{st,So} = \underline{\hspace{2cm}} m^{1/3}/s$

**2) Wahl der Uferböschungsrauheiten  $k_{st,Bö,li}$  und  $k_{st,Bö,re}$  [ $m^{1/3}/s$ ]**

Beschreibung .....	$k_{st}$ -Wert	Wahl	
		li.	re.
• kein Bewuchs, homogen.....	30 bis 40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Baumbewuchs – nur Stämme umströmt (evtl. hier Flächenabzugsverfahren!).....	17 bis 29	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Buschbewuchs – Astwerk durchströmt (evtl. Flächenabzugsverfahren!).....	7 bis 13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Verkrautung .....	8 bis 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Grasbewuchs.....	15 bis 25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Gewählte Uferböschungsrauheit:**  $k_{st,Bö,li} = \underline{\hspace{2cm}} m^{1/3}/s$  und  $k_{st,Bö,re} = \underline{\hspace{2cm}} m^{1/3}/s$

**3) Wahl der Vorlandrauheiten  $k_{st,V,li}$  und  $k_{st,V,re}$  [ $m^{1/3}/s$ ]**

Beschreibung .....	$k_{st}$ -Wert	Wahl	
		li.	re.
• Grasflächen ohne Büsche ...			
...kurzes Gras .....	28 bis 40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...hohes Gras .....	20 bis 33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• landwirtschaftlich genutzte Flächen ...			
...ohne Bepflanzung bzw. überströmter Bewuchs, der sich anschmiegt.....	25 bis 40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...mit Bepflanzung bzw. umströmter Bewuchs mit signifikantem Widerstand .....	20 bis 35	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Buschbewuchs...			
...vereinzelt .....	14 bis 35	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...unregelmäßig verteilt, im Frühjahr und Sommer mit Blätter.....	13 bis 25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...unregelmäßig verteilt, im Herbst und Winter ohne Blätter .....	17 bis 28	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...starker Vorlandbewuchs im Frühjahr und Sommer.....	6 bis 14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...starker Vorlandbewuchs im Herbst und Winter.....	9 bis 22	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Baumbewuchs ...			
...nur Stämme werden umströmt (evtl. Flächenabzugsverfahren!) .....	20 bis 33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...umströmtes dichtes Astwerk, bewachsen .....	13 bis 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...umströmter Jung- bzw. Kleinbewuchs, der sich nicht anschmiegt.....	6 bis 13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Gewählte Vorlandrauheiten:**  $k_{st,V,li} = \underline{\hspace{2cm}} m^{1/3}/s$  und  $k_{st,V,re} = \underline{\hspace{2cm}} m^{1/3}/s$

Alle angegebenen Zahlenwerte wurden der Literatur entnommen, vgl. dazu [1], [2], [3], [4], [6], [9] und [8].

<b>Vereinfachte Abschätzung des <math>k_{st,ges}</math>-Wertes nach COWAN (→Kap. 5.2.1)</b>				
<b>Beschaffenheit des Sohlenmaterials (<math>n_0</math>)</b> Erde..... 0,020 <input type="checkbox"/> gebrochener Fels ..... 0,025 <input type="checkbox"/> Feinkies ..... 0,024 <input type="checkbox"/> Grobkies ..... 0,028 <input type="checkbox"/>	<b>Änderungen in der Gerinnequerschnittsform (<math>n_2</math>)</b> schwach .....0,000 <input type="checkbox"/> selten auftretend ....0,005 <input type="checkbox"/> häufig auftretend ....0,010 bis 0,015 <input type="checkbox"/>	<b>Einfluss von Bewuchs (<math>n_4</math>)</b> nieder ..... 0,005 bis 0,010 <input type="checkbox"/> mittel ..... 0,010 bis 0,025 <input type="checkbox"/> hoch ..... 0,025 bis 0,050 <input type="checkbox"/> sehr hoch ..... 0,050 bis 0,100 <input type="checkbox"/>		
<b>Unregelmäßigkeit des Sohlenmaterials (<math>n_1</math>)</b> vernachlässigbar ..... 0,000 <input type="checkbox"/> gering ..... 0,005 <input type="checkbox"/> mittel ..... 0,010 <input type="checkbox"/> stark ..... 0,020 <input type="checkbox"/>	<b>Einfluss von Hindernissen (<math>n_3</math>)</b> vernachlässigbar ....0,000 <input type="checkbox"/> gering .....0,010 bis 0,015 <input type="checkbox"/> merklich .....0,020 bis 0,030 <input type="checkbox"/> stark.....0,040 bis 0,060 <input type="checkbox"/>	<b>Mäandrierungsgrad (<math>m_5</math>)</b> gering ..... 1,000 <input type="checkbox"/> merklich ..... 1,150 <input type="checkbox"/> stark ..... 1,300 <input type="checkbox"/>		
<b>Berechnung des <math>k_{st,ges}</math>-Wertes nach COWAN: <math>k_{st,ges} = 1 / [(n_0+n_1+n_2+n_3+n_4) \cdot m_5] =</math> _____</b> <b><math>m^{1/3}/s</math></b>				
<b>Beschreibung der Bewuchseigenschaften (Angabe der Abmessungen etc.)</b>				
	Vorland links	Uferböschung links	Uferböschung rechts	Vorland rechts
Junge Bäume, Verästelung umströmt				
Alte Bäume, nur Stamm umströmt				
Junge Weiden und Röhrichte, die sich umlegen				
Alte Weiden und Sträucher mit stabilen Widerstand				
Sonstige				
<b>Foto des Gewässerabschnittes</b>				
Film Nr.: _____                      Foto Nr.: _____                      Standort: _____ Aufnahme/Blickrichtung: <input type="checkbox"/> nach OW <input type="checkbox"/> nach UW <input type="checkbox"/> vom rechten Ufer aus <input type="checkbox"/> vom linken Ufer aus <input type="checkbox"/> von Brücke Bemerkungen: _____				

## 5. Berechnung von Abfluss oder Wasserstand in Gerinnen mit der GMS-Formel

Im folgenden Kapitel wird die Vorgehensweise bei einer hydraulischen Berechnung mit der GMS-Formel erläutert (vgl. Verlaufsdiagramm auf der folgenden Seite).

Hierfür wird dem Anwender zunächst eine Einteilung der natürlichen Querschnitte in kompakte und gegliederte Gerinne gezeigt (Kap. 5.1).

Anschließend wird auf Verfahren zur Bestimmung des  $k_{st}$ -Wertes eingegangen. Dabei kommen neben den in Kapitel 4 angegebenen Richtwerten je nach Querschnittscharakteristik das Verfahren nach COWAN oder das Verfahren nach EINSTEIN/HORTON zum Einsatz (Kap. 5.2).

Die Wahl der  $k_{st}$ -Werte stellt den eigentlichen „Knackpunkt“ der Berechnung dar, da hier große Fehlannahmen getroffen werden können (vgl. Kap. 4). Deshalb dient als Ergänzung hierzu auch der Teil 3 des Leitfadens „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“. Dieser enthält eine ausführliche Dokumentation von Rauheits- und Widerstandsbeiwerten (vgl. Kap. 1).

In einem nächsten Schritt erfolgt die eigentliche hydraulische Berechnung des Abflusses oder des Wasserstandes mit der GMS-Formel. Hier wird zwischen der Berechnung in einem Schritt, und der gegliederten Berechnung unterschieden (Kap. 5.3).

Anhand von Beispielen werden die Verfahren vorgestellt und angewendet. Auf der folgenden Seite ist der prinzipielle Arbeitsablauf skizzenhaft dargestellt. Dieser wird in den entsprechenden Unterkapitel jeweils ergänzt.

**An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass mit den hier vorgestellten empirischen Ansätzen die tatsächliche hydraulische Situation am Gewässer nur grob erfasst wird. Deshalb gelten die Ergebnisse als gute Näherung.**

Genauere Berechnungsverfahren sind im Teil 2 des Leitfadens „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“ angegeben.

### 5.1 Gerinnegeometrien: Aufteilung in kompakte und gegliederte Gerinne

Für eine vereinfachte hydraulische Berechnung des Abflusses in einem naturnahen Gerinne ist die Bestimmung des Rauheitsbeiwertes ( $k_{st}$ -Wert) oftmals schwieriger, als es in Lehrbüchern dargestellt wird.

Die komplexe Struktur eines naturnahen Gerinnes ist sehr vielfältig. Neben der Berücksichtigung der Gerinnegeometrie spielen u.a. auch die Bewuchselemente bei der Bestimmung des Rauheitsbeiwertes eine wichtige Rolle.

In diesem Leitfaden wird vereinfachend zwischen zwei grundlegenden Gerinnegeometrien differenziert. Dies sind **kompakte** und **gegliederte** Gerinne.

Die vorgestellten Verfahren zur Ermittlung der  $k_{st}$ -Werte sollen es dem Anwender neben der katalogisierten Dokumentation von Rauheits- und Widerstandsbeiwerten (Leitfaden Teil 3) ermöglichen, selbständig STRICKLER-Beiwerte zu bestimmen und damit ein Gefühl im Umgang mit Rauheits- und Widerstandsbeiwerten zu bekommen.

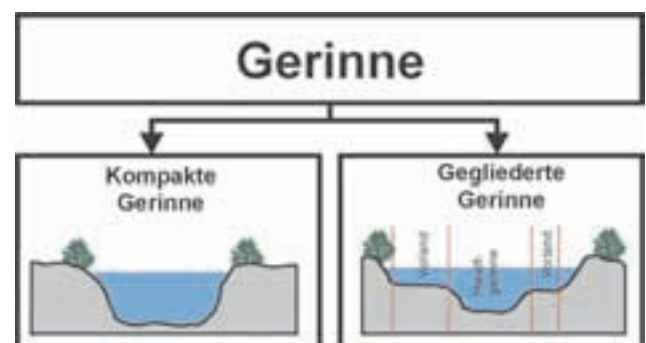
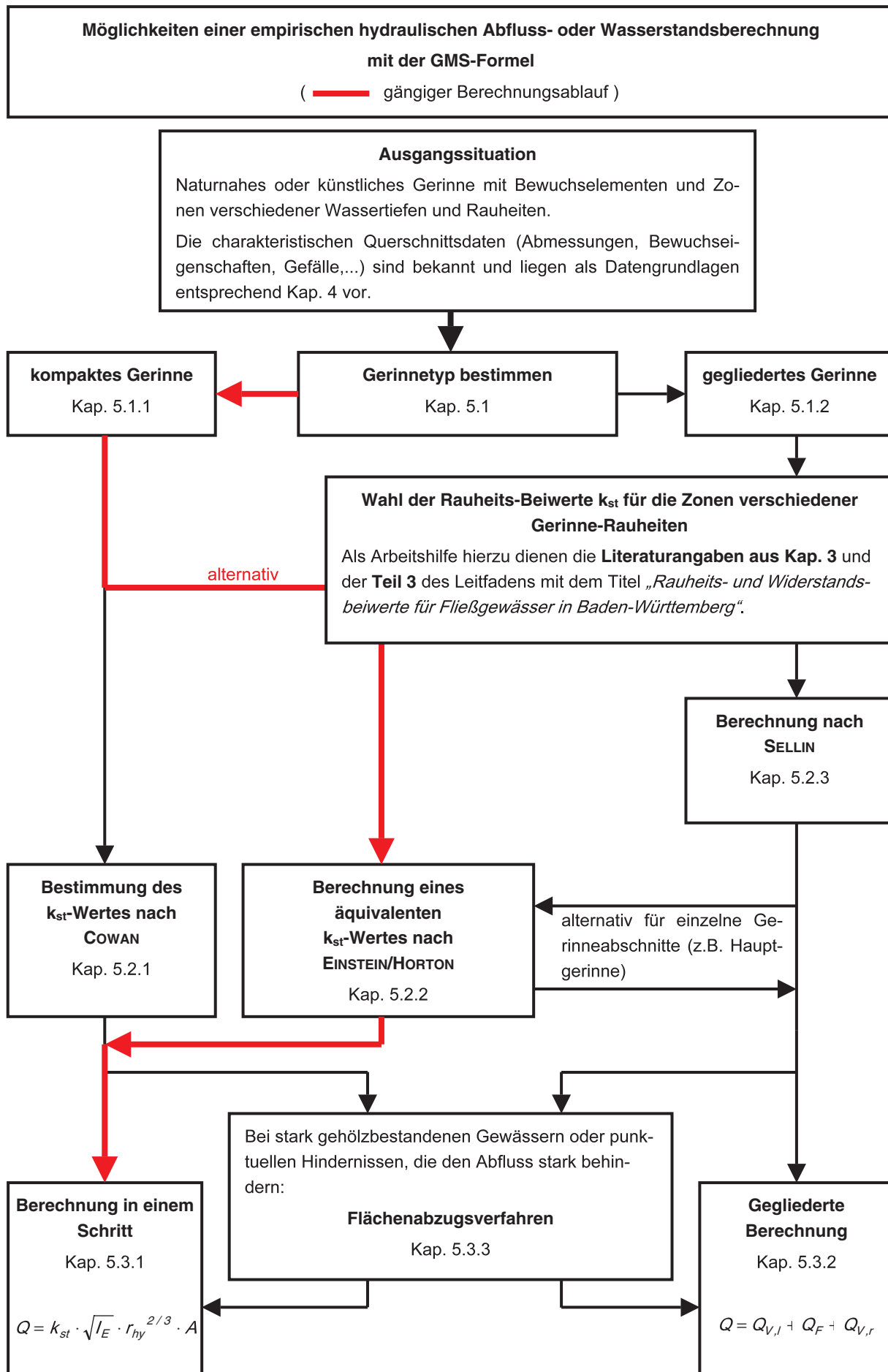


Abb. 40: Gliederung der Gerinne nach geometrischen Eigenschaften in kompakte und gegliederte Gerinne.





### 5.1.1 Kompakte Gerinne

Als kompaktes Gerinne wird ein mehr oder weniger trapezförmiges Gerinne mit über die Breite nahezu konstanter Wassertiefe bezeichnet. Die Querschnittsform gestaltet sich dabei so, dass trotz abschnittsweiser unterschiedlicher Rauheiten die Geschwindigkeitsprofile über den einzelnen Abschnitten nur wenig variieren [6].

Definitionsgemäß kann man bei einem kompakten Gerinne von jeder Stelle der Gerinnewandung eine Linie zum tiefsten Gerinnepunkt ziehen, ohne daß die Linie dabei die Böschungskanten schneidet. Ein Beispiel hierzu ist in Abb. 41 dargestellt.

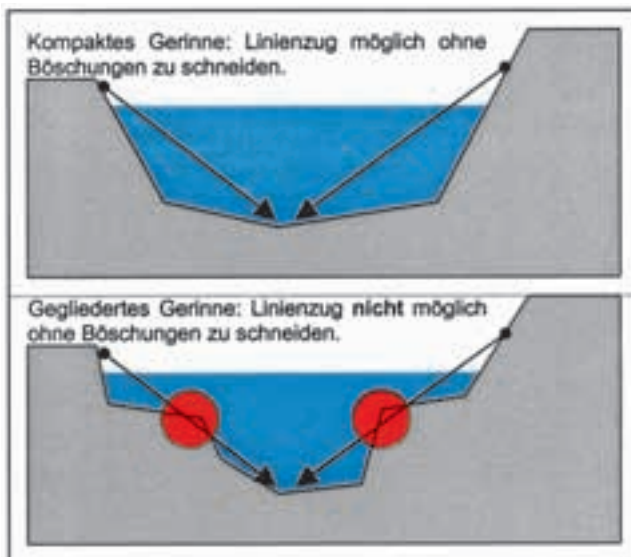


Abb. 41: Definition für kompakte und gegliederte Gerinne.

Vor allem bei natürlichen oder naturnah ausgebauten Gerinnen können - je nach Bewuchs und Verbau – in einem Querschnitt stellenweise unterschiedliche Rauheiten vorliegen. Diese sind bei einer hydraulischen Berechnung durch unterschiedliche  $k_{st}$ -Werte zu berücksichtigen.

In Abb. 42 ist die Aufteilung eines kompakten Gerinnequerschnittes mit unterschiedlichem Bewuchs in Zonen verschiedener Rauheiten schematisch dargestellt.

Hierbei ist zu erkennen, daß bei naturnahen Gewässern z.B. die Sohle eine andere Rauheit als der untere und obere Böschungsbereich aufweisen kann.

Auf der folgenden Seite werden zwei Bildbeispiele aus der Praxis für kompakte Gerinne aufgezeigt.

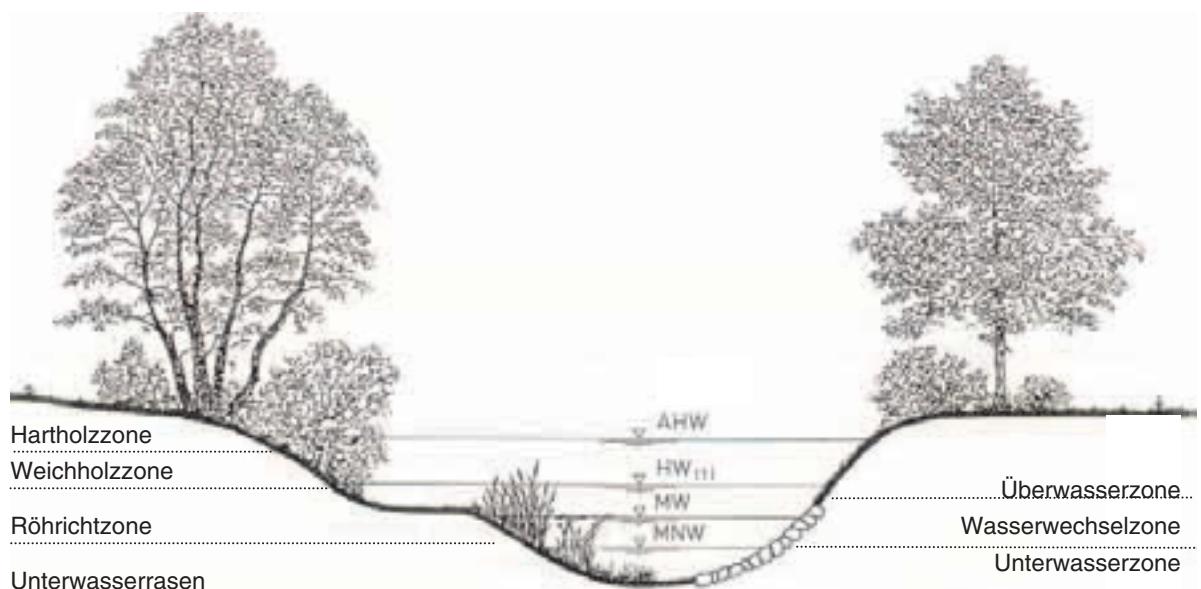


Abb. 42: Kompaktes Gerinne mit unterschiedlichen Rauheiten. Hier kann mit entsprechendem Berechnungsverfahren ein „gewichteter“ äquivalenter  $k_{st}$ -Wert ermittelt werden (siehe dazu Kap. 5.2.2: Verfahren nach EINSTEIN/HORTON).



Abb. 43:

Vereinfachte Querschnittsdarstellung der Elz im Bereich Gutach. Hier handelt es sich um einen kompakten Querschnitt mit steilen Böschungen und relativ breiter Sohle.

Abb. 44:

Die Elz im Bereich Gutach vom linken Ufer in Fließrichtung aufgenommen.

Man erkennt gut die Sohlstruktur und den Uferbewuchs.

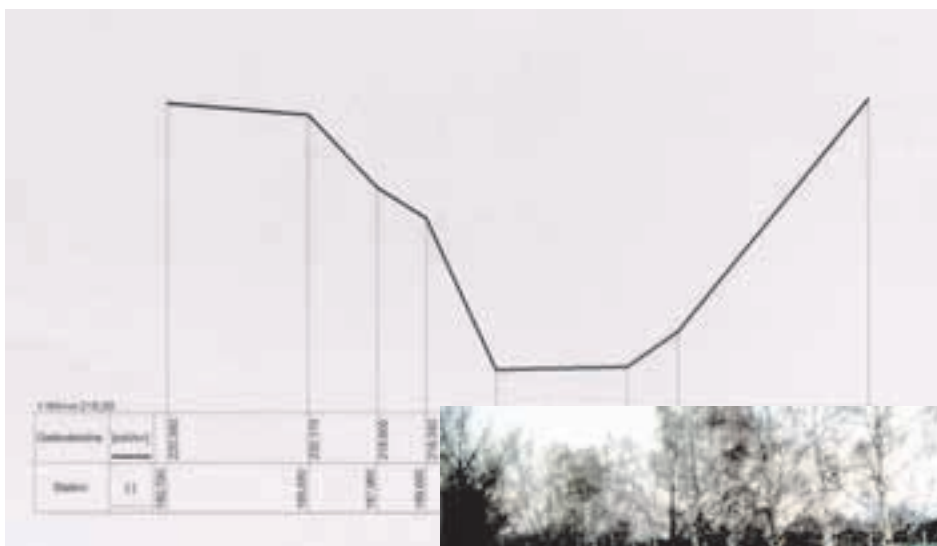


Abb. 45:

Vereinfachte Querschnittsdarstellung der Ohrn im Bereich Öhringen. Hier kann ebenfalls noch von einem kompakten Querschnitt ausgegangen werden.

Abb. 46:

Die Ohrn im Bereich Öhringen vom rechten Ufer in Fließrichtung aufgenommen.

Man erkennt gut die grasbewachsene linke Uferböschung.



### 5.1.2 Gegliederte Gerinne

Trifft die bei kompakten Gerinnen notwendige Bedingung der näherungsweise gleich großen Fließgeschwindigkeiten in allen Teilen des Fließquerschnittes nicht zu, so spricht man von einem gegliederten Gerinne.

Bei gegliederten Gerinnen handelt es sich oft um unregelmäßige Querschnitte mit teilweise inhomogenen, über die Gerinnebreite verteilten Bewuchselementen.

Besonders die Hochwasserabflussquerschnitte von Flüssen bestehen aus einem Mittelwasserbett und den Vorländern, die nur bei Hochwasser überflutet werden (siehe Abb. 47).

Solche Abflussquerschnitte müssen für eine hydraulische Berechnung in einzelne Teilquerschnitte (z.B. Mittelwasserbett und Vorländer) aufgeteilt werden.

In Kap. 5.2.3 wird das Berechnungsverfahren von SELLIN vorgestellt, mit dem man den Abfluss bzw. den Wasserstand bei gegliederten Gerinnen ermitteln kann.

Auf der folgenden Seite sind zwei Beispiele für gegliederte Gerinne aus der Praxis dargestellt.

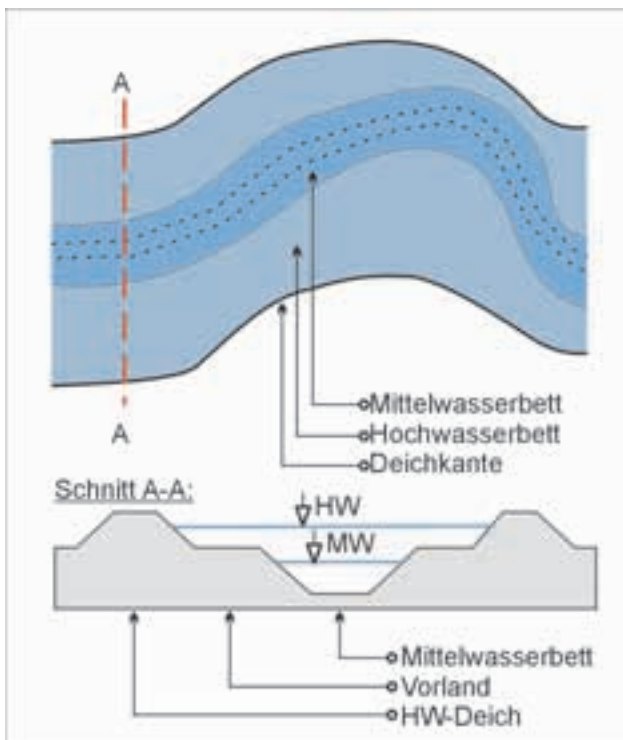


Abb. 47: Gegliedertes Flussbett, unterteilt nach Niedrig-, Mittel- und Hochwasserbett, verändert nach [4].



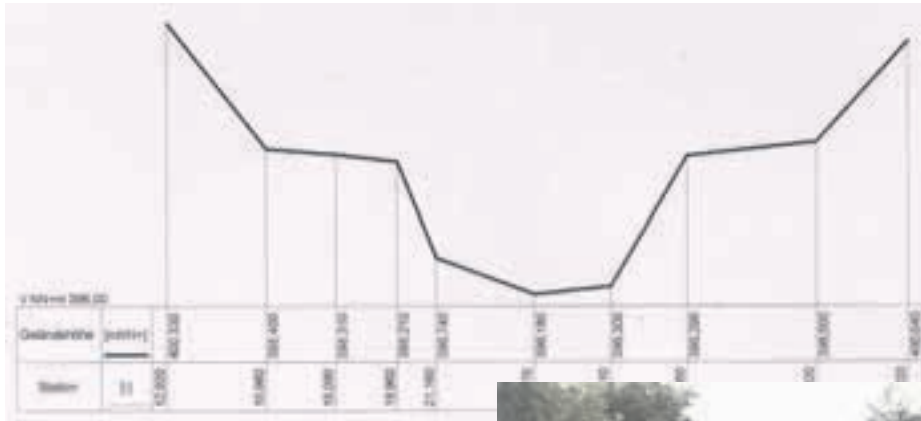


Abb. 48:  
Vereinfachte Darstellung des charakteristischen Querschnittes der Rotach im Bereich Friedrichshafen.  
Hier handelt es sich um ein gegliedertes Gerinne.

Abb. 49: Die Rotach als gegliedertes Gerinne in Fließrichtung aufgenommen.

Bei Hochwasser werden die Vorländer überströmt. Beide Vorländer sind grasbewachsen und vereinzelt mit kleinen Bäumen bepflanzt. Im Anschluss an die Vorländer folgt eine Dammböschung. Entlang der rechten Dammkronen verläuft ein ausgebauter Weg.

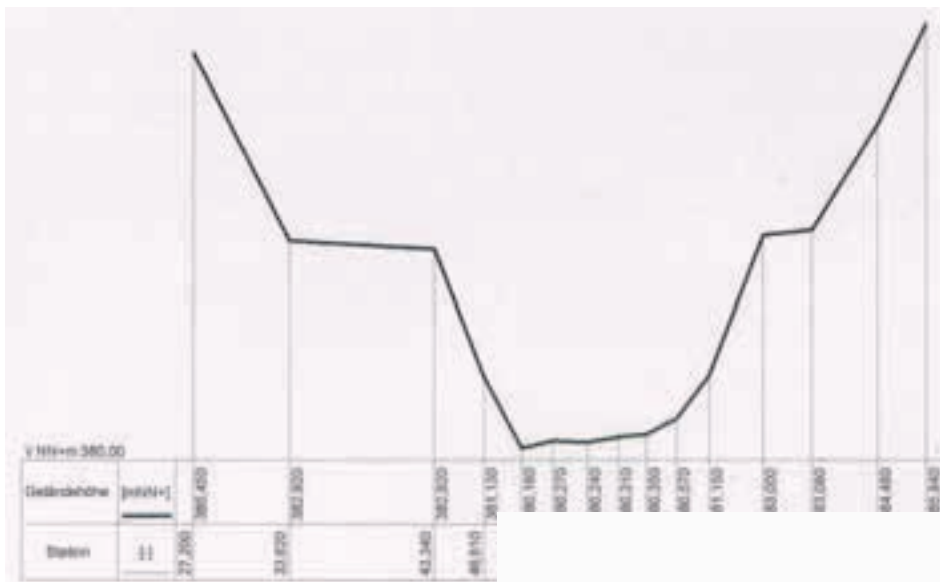


Abb. 50:  
Vereinfachte Darstellung des charakteristischen Querschnittes des Neckar im Bereich Horb.

Abb. 51: Der Neckar im Bereich des Pegels Horb in Fließrichtung aufgenommen.

Hier ist deutlich eine Gliederung zwischen Hauptgerinne und wiesenbewachsenem Vorland zu erkennen. Die Uferböschungen sind mit Röhricht bewachsen, die Vorländer sind grasbewachsen.



## 5.2 Bestimmung des $k_{st}$ -Wertes

Der  $k_{st}$ -Wert spielt bei einer vereinfachten hydraulischen Berechnung mit der GMS-Formel die zentrale Rolle.

Bei bekannter Gerinnegeometrie und Bewuchscharakteristik ist der  $k_{st}$ -Wert in der GMS-Formel der „offene“ Parameter, um aus vorgegebenen oder hydrologisch abgeleiteten Abflüssen die eigentlich interessierende Größe „Wasserstand“ bzw. Wassertiefe zu ermitteln.

Unabhängig, ob es Möglichkeiten der Anpassung des STRICKLER-Beiwertes gibt, sollte in einem ersten Schritt eine sorgfältige Wahl dieses Beiwertes erfolgen, um schnell ein Gefühl für den  $k_{st}$ -Wert zu bekommen.

In diesem Kapitel werden dem Anwender Verfahren zur Bestimmung des  $k_{st}$ -Wertes erläutert, mit denen der geschätzte Wert überprüft und ggf. korrigiert werden kann. Hilfreich dabei sind auch die in Kap. 3 zusammengetragenen Literaturangaben.

Aufgrund der Tatsache, dass der  $k_{st}$ -Wert über einen Analogieschluss zu hydraulisch sich ähnlich verhaltenden Gewässern abzuschätzen ist, können die Literaturwerte für eine erste Schätzung herangezogen werden.

Ferner gibt es die bebilderte Sammlung von VEN TE CHOW [8], bei der 24, nach Rauheitswerte abgestufte Kanäle und Gewässer durch Fotos und Kurztex te charakterisiert sind.

Ein weiteres wichtiges Hilfsmittel ist auch der Teil 3 des Leitfadens „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“, in dem ebenfalls bildlich und textlich Rauheits- und Widerstandsbeiwerte von Gewässerabschnitten in Baden-Württemberg dokumentiert sind (vgl. Kap. 1).

Bevor nun in den Unterkapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 auf die Verfahren zur Bestimmung des  $k_{st}$ -Wertes eingegangen wird, sollen zunächst in Ergänzung zu Kap. 3 dessen wichtigste Einflussgrößen aufgezählt werden.

- **Der STRICKLER-Beiwert ist ein absolutes und kein relatives Maß für die Rauheit:** Eine bestimmte Oberflächenstruktur hat beim Rhein den gleichen STRICKLER-Beiwert wie bei einem kleinen Bach.
- Der  $k_{st}$ -Wert beschreibt im Sinne der Herleitung eine gleichmäßige Wandungsrauheit in einem kompakten und geraden Gerinne.
- Die Dimension des STRICKLER-Beiwertes [ $m^{1/3}/s$ ] lässt erkennen, dass es sich nicht um einen aus Rauheitserhebungen direkt messbaren Wert handelt. Er wird empirisch ermittelt.
- Folgende Einflüsse auf die Abflussleistung bzw. dem Wasserstand müssen im STRICKLER-Beiwert berücksichtigt werden:
  - Benetzungsgrad (z.B. bordvoller Abfluss),
  - Uferbewuchs,
  - Mäandrieren des Gewässers,
  - Geschiebeführung,
  - Verkrautung,
  - vereinzelte, beim geometrischen Aufmaß nicht erfassbare Abflusshindernisse (z.B. einzelne große Steine, Totholzansammlungen, Wurzeln u.ä.)

In Verbindung mit Uferbewuchs können diese Einflüsse dazu führen, dass der für das gesamte Gerinne geltende „gewichtete“ STRICKLER-Beiwert (siehe Kap. 5.2.2) trotz einer relativ „glatten“ Wandungsrauheit sehr klein wird. Dieses Phänomen erheblicher Rauheitszunahme ist umso ausgeprägter, je kleiner der Bachlauf ist.

- Schwierigkeiten bei der Festlegung der Rauheitsbeiwerte macht die saisonale Schwankung der Aufwuchsdichte und -höhe im Gewässer (Verkrautung) und am Gewässer (Uferbewuchs).

Dieses Problem ist bei großen Flüssen (Rhein, Neckar) verhältnismäßig unbedeutend. Praktisch kaum lösbar ist es bei kleinen Entwässerungsgräben, die im Sommer vor einer Entkrautung zugewachsen ( $k_{st} \approx 5 \text{ m}^{1/3}/s$ ) und nach einer Mahd frei wie im Winter ( $k_{st} \approx 25 \text{ m}^{1/3}/s$ ) sind.

### 5.2.1 Verfahren nach COWAN

Eine schnelle und einfache Möglichkeit der Abschätzung des Rauheitsbeiwertes bietet der in [7] gezeigte Ansatz nach COWAN.

Da es sich hierbei um englischsprachige Literatur handelt und im englischsprachigen Raum als Rauheitsbeiwert vorwiegend der MANNING-Beiwert  $n = 1/k_{st}$  verwendet wird, beziehen sich die folgenden Angaben auf den MANNING-Beiwert.

COWAN betrachtet mehrere vor Ort für den Betrachter sichtbare Eigenschaften, die den MANNING-Beiwert  $n$  beeinflussen. Dieser berechnet sich daher aus der Summe von vier verschiedenen Teilbeiwerten  $n_0, n_1, n_2, n_3, n_4$  multipliziert mit einem Faktor  $m_5$ :

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad [\text{s/m}^{1/3}] \quad (18)$$

Die Teilbeiwerte  $n_i$  aus Gleichung (18) können der nebenstehenden Tabelle entnommen werden.

Die Tabelle wurde dem englischsprachigem Werk von VEN TE CHOW [8] entnommen und leicht verändert.

Der Schwachpunkt des Ansatzes von COWAN besteht darin, dass die Gerinnebreite und relative Wassertiefe nicht berücksichtigt werden.

Der selbe Uferbewuchs hat jedoch bei einem schmalen Gerinne einen wesentlich größeren Einfluss auf die Abflussleistung als bei einem sehr breiten Gerinne.

Ebenfalls wird der Wasserstand bzw. der Füllstand des Gerinnes nicht berücksichtigt.

Somit kann bei einer hydraulischen Berechnung verschiedener Abflusszustände eine eventuelle Änderung der Rauheitsbeiwerte (z.B. infolge sich an die Strömung anschmiegender Weiden bei starker Überströmung) nicht richtig erfasst werden.

Es wird empfohlen, den  $k_{st}$ -Beiwert zusätzlich noch nach dem in Kap. 5.2.2 vorgestellten Verfahren von EINSTEIN/HORTON abzuschätzen.

<b><math>n_0</math> : Beschaffenheit des Sohlmaterials</b>	
Erde	0,020
gebrochener Fels	0,025
Feinkies	0,024
Grobkies	0,028
<b><math>n_1</math> : Unregelmäßigkeit des Sohlmaterials</b>	
vernachlässigbar	0,000
gering	0,005
mittel	0,010
stark	0,020
<b><math>n_2</math> : Änderungen in der Gerinnequerschnittsform</b>	
schwach	0,000
gelegentlich auftretend	0,005
häufig auftretend	0,010 bis 0,015
<b><math>n_3</math> : Einfluss von Hindernissen</b>	
vernachlässigbar	0,000
gering	0,010 bis 0,015
merklich	0,020 bis 0,030
stark	0,040 bis 0,060
<b><math>n_4</math> : Einfluss von Bewuchs</b>	
nieder	0,005 bis 0,010
mittel	0,010 bis 0,025
hoch	0,025 bis 0,050
sehr hoch	0,050 bis 0,100
<b><math>m_5</math> : Mäandrierungsgrad</b>	
gering	1,000
merklich	1,150
stark	1,300

Tab. 1: Faktoren zur Bestimmung des Manning-Beiwertes nach COWAN.

### Beispiel 2



Abb. 52: Ein kleiner, nicht ausgebauter, natürlicher Bachlauf mit unregelmäßigem Sohlmaterial, einigen Hindernissen und einseitiger, dichter Vegetation.

- *Beschaffenheit des Sohlmaterials:*  
Grobkies  $\Rightarrow n_0 = 0,028$
- *Unregelmäßigkeit des Sohlmaterials:*  
mittel  $\Rightarrow n_1 = 0,010$
- *Änderung in der Gerinnequerschnittsform:*  
gelegentlich auftretend  $\Rightarrow n_2 = 0,005$
- *Einfluss von Hindernissen:*  
gering  $\Rightarrow n_3 = 0,010$
- *Einfluss von Bewuchs:*  
mittel  $\Rightarrow n_4 = 0,020$
- *Mäandrierungsgrad:*  
merklich  $\Rightarrow m_5 = 1,150$

Daraus berechnet sich folgender Rauheitsbeiwert:

$$n = (0,028 + 0,010 + 0,005 + 0,010 + 0,025) \cdot 1,150$$

$$n = 0,084 \Leftrightarrow k_{st} = 1/n \approx 12 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

Wird in diesem Beispiel der Einfluss der Vegetation stärker eingeschätzt und z.B.  $n_4 = 0,035$  gesetzt, so ergibt sich ein STRICKLER-Beiwert von  $k_{st} \approx 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

### Beispiel 3



Abb. 53: Ein leicht mäandrierender Bach mit einer Sohle aus Erde und schwachem Bewuchs, der jedoch keinen natürlichen Verlauf mehr aufweist.

$$\begin{aligned} n_0 &= 0,020 \\ n_1 &= 0,000 \\ n_2 &= 0,000 \\ n_3 &= 0,000 \\ n_4 &= 0,002 \text{ bis } 0,005 \\ m_5 &= 1,150 \\ k_{st} &\approx 35 \text{ bis } 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \end{aligned}$$

### Beispiel 4



Abb. 54: Ein größerer, schwach mäandrierender Bach mit einer Sohle aus feinem Kies und stärkerem Bewuchs, der ebenfalls keinen natürlichen Verlauf mehr aufweist.

$$\begin{aligned} n_0 &= 0,022 \\ n_1 &= 0,000 \\ n_2 &= 0,000 \\ n_3 &= 0,000 \\ n_4 &= 0,005 \text{ bis } 0,010 \\ m_5 &= 1,100 \\ k_{st} &\approx 28 \text{ bis } 34 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \end{aligned}$$

Dieser Bachlauf ist trotz der geringeren Mäandrierung im Vergleich zu Beispiel 3 durch einen niedrigeren  $k_{st}$ -Wert gekennzeichnet, da er ein



gröberes Sohlmaterial und einen stärkeren Böschungsbewuchs aufweist.

### Beispiel 5



Abb. 55: Fluss mit Grasbewuchs sowie aufgelockertem Großbewuchs auf den Vorländern und einer Sohle aus Erde.

$$\begin{aligned} n_0 &= 0,020 \\ n_1 &= 0,000 \\ n_2 &= 0,000 \\ n_3 &= 0,000 \\ n_4 &= 0,003 \text{ bis } 0,005 \\ m_5 &= 1,100 \\ k_{st} &\approx 40 \text{ bis } 44 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \end{aligned}$$

### Beispiel 6



Abb. 56: Fluss mit einer Sohle aus Erde und etwas stärkerem Uferbewuchs.

$$\begin{aligned} n_0 &= 0,020 \\ n_1 &= 0,000 \\ n_2 &= 0,002 \\ n_3 &= 0,000 \\ n_4 &= 0,010 \text{ bis } 0,015 \\ m_5 &= 1,000 \\ k_{st} &\approx 27 \text{ bis } 32 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \end{aligned}$$

### Beispiel 7



Abb. 57: Bach mit einer Sohle aus Erde und starkem Uferbewuchs.

$$\begin{aligned} n_0 &= 0,020 \\ n_1 &= 0,000 \\ n_2 &= 0,005 \\ n_3 &= 0,005 \\ n_4 &= 0,035 \text{ bis } 0,050 \\ m_5 &= 1,000 \\ k_{st} &\approx 12 \text{ bis } 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \end{aligned}$$

### Beispiel 8



Abb. 58: Bach mit leichter Mäandrierung, einer Sohle aus Erde und starkem Uferbewuchs, der jedoch etwas lichter als in Beispiel 7 ist.

$$\begin{aligned} n_0 &= 0,020 \\ n_1 &= 0,000 \\ n_2 &= 0,002 \\ n_3 &= 0,000 \\ n_4 &= 0,030 \text{ bis } 0,040 \\ m_5 &= 1,100 \\ k_{st} &\approx 14 \text{ bis } 18 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \end{aligned}$$

**Beispiel 9:**

Abb. 59: Gerader Bach mit extrem starkem Bewuchs und einer Sohle aus Erde.

$$\begin{aligned}
 n_0 &= 0,020 \\
 n_1 &= 0,000 \\
 n_2 &= 0,005 \\
 n_3 &= 0,005 \\
 n_4 &= 0,050 \text{ bis } 0,090 \\
 m_5 &= 1,000 \\
 k_{st} &\approx 8 \text{ bis } 13 \text{ m}^{1/3}/\text{s}
 \end{aligned}$$

Die Beispiele 7 bis 10 zeigen vier Bäche, die alle durch starken Uferbewuchs gekennzeichnet sind.

In den Beispielen 7 und 8 wird der Bewuchs bei Hochwasser durchströmt, während bei den Beispielen 9 und 10 der Bewuchs so dicht und damit widerstandsfähig ist, dass selbst bei Hochwasser keine kontinuierliche Durchströmung stattfinden wird.

Daher ist bei den beiden letzten Beispielen der STRICKLER-Beiwert besonders niedrig, was den eingangs erwähnten Einfluss des Bewuchses auf den STRICKLER-Beiwert verdeutlicht.

**Beispiel 10**

Abb. 60: Bach mit einer Sohle aus Erde und starkem Uferbewuchs.

$$\begin{aligned}
 n_0 &= 0,020 \\
 n_1 &= 0,000 \\
 n_2 &= 0,002 \\
 n_3 &= 0,000 \\
 n_4 &= 0,045 \text{ bis } 0,070 \\
 m_5 &= 1,000 \\
 k_{st} &\approx 10 \text{ bis } 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}
 \end{aligned}$$

## 5.2.2 Verfahren nach EINSTEIN/HORTON

So, wie die mit der GMS-Formel berechenbare Fließgeschwindigkeit einen Mittelwert über den durchflossenen Querschnitt darstellt, ist der STRICKLER-Beiwert ein Mittelwert der Rauheiten über den benetzten Umfang.

Sind in einem Gerinne unterschiedliche Rauheitsstrukturen vorhanden (z.B. durch Uferbewuchs, Uferbefestigung, Sohlsicherung, usw.), so wird der äquivalente STRICKLER-Beiwert für den gesamten Abflussquerschnitt mit dem Verfahren von EINSTEIN/HORTON gebildet.

Die Berechnung des äquivalenten STRICKLER-Beiwertes wird nach folgender Beziehung durchgeführt:

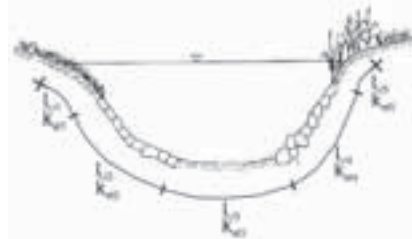
$$k_{st} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n l_{U,i}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_{U,i}}{k_{st,i}^{3/2}}} \right)^{2/3} \quad [m^{1/3}/s] \quad (19)$$

$k_{st}$  : äquivalenter STRICKLER-Beiwert in  $m^{1/3}/s$   
 $l_{U,i}$  : benetzter Teilumfang mit Rauheit  $k_{st,i}$  in m  
 $k_{st,i}$  : Teilrauheit in  $m^{1/3}/s$

### Verfahren nach EINSTEIN/HORTON zur Berechnung eines äquivalenten $k_{st}$ -Wertes

#### Eingangsgrößen:

- kompaktes Gerinne mit vermessener Querschnittsgeometrie
- benetzte Teilumfänge  $l_{U,i}$  in m
- Teilrauheits-Beiwerte  $k_{st,i}$  in  $m^{1/3}/s$



#### Berechnung eines äquivalenten Rauheitsbeiwertes für den Querschnitt:

$$k_{st} = \left( \frac{\sum l_{U,i}}{\sum \frac{l_{U,i}}{k_{st,i}^{3/2}}} \right)^{2/3} \quad [m^{1/3}/s]$$

#### Berechnung in einem Schritt

Kap. 5.3.1





Man erhält folgende Ergebnisse:

- $A = 42,96 \text{ m}^2$
- $l_U = \sum l_{U,i} = 23,29 \text{ m}$  mit den einzelnen Teilumfängen entsprechend Abb. 62:  
 Böschung links :  $l_{U,li} = 3,97 \text{ m}$   
 Böschung rechts :  $l_{U,re} = 7,41 \text{ m}$   
 Hauptgerinne :  $l_{U,F} = 11,91 \text{ m}$

Für die Berechnung wird vereinfachend von gleichförmigen Abflussbedingungen ausgegangen. Somit kann anstelle des Energieliniengefälles das Sohlprofilgefälle angesetzt werden.

Das mittlere Sohlprofilgefälle wurde aus einem Gewässerlängsschnitt ermittelt:

- $I_{so} = 0,0019 \text{ m/m}$

Der Querschnitt wird in drei Rauheitszonen aufgeteilt:

- Die beiden Böschungen bestehen aus grobem Steinwurf mit Gras verwachsen. Zusätzlich sind noch vereinzelt Sträucher vorhanden. Der STRICKLER-Beiwert wird hierfür gewählt zu  $k_{st,Böschung} = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (vgl. Literaturangaben für Vorländer in Kap. 3).
- Die Sohlrauheit wird gewählt zu  $k_{st,Sohle} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (vgl. Literaturangaben für natürliche Flüsse in Kap. 3).

Die äquivalente Gerinnerrauheit  $k_{st}$  berechnet sich nach EINSTEIN/HORTON zu:

$$k_{st} = \left[ \frac{l_U}{\sum_{i=1}^n \left( l_{U,i} / (k_{st,i})^{3/2} \right)} \right]^{2/3}$$

$$= \left[ \frac{23,29}{\left( \frac{3,97}{15^{3/2}} \right) + \left( \frac{11,91}{30^{3/2}} \right) + \left( \frac{7,41}{15^{3/2}} \right)} \right]^{2/3}$$

$$\approx 20 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$$

Nach der GMS-Formel berechnet sich der Abfluss damit zu:

$$Q = k_{st} \cdot \sqrt{I_S} \cdot R^{2/3} \cdot A$$

$$= 20 \cdot \sqrt{0,0019} \cdot \left( \frac{A}{l_U} \right)^{2/3} \cdot A$$

$$= 20 \cdot \sqrt{0,0019} \cdot \left( \frac{42,96}{23,29} \right)^{2/3} \cdot 42,96$$

$$\approx 56,5 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Durch gleichzeitige Abflussmessungen an einem unterhalb gelegenen Pegel kann der berechnete Abfluss in etwa bestätigt werden ( $Q_{\text{Pegel}} = 59,30 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Zum Vergleich soll bei diesem Beispiel der  $k_{st}$ -Wert noch einmal nach dem Verfahren von COWAN berechnet werden:

$$k_{st} = \frac{1}{n} \left[ \text{m}^{1/3} / \text{s} \right]$$

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \left[ \text{s} / \text{m}^{1/3} \right]$$

mit den Teilbeiwerten entsprechend Kap. 5.2.1:

- $n_0 = 0,026$ , da das Sohlmaterial aus Grob- und Feinkies besteht;
- $n_1 = 0,005$ , da geringe Unregelmäßigkeiten auf der Sohle zu erkennen sind;
- $n_2 = 0,000$ , da im betrachteten Bereich keine Querschnittsformänderung zu erkennen ist;
- $n_3 = 0,000$ , da im Flussbett keine Hindernisse zu erkennen sind;
- $n_4 = 0,014$  für eine mittlere Auswirkung des Bewuchses auf das Abflussgeschehen. Die Ufer bestehen im relevanten Bereich aus groben Steinen, verwachsen mit Gras und einzelnen Sträuchern;
- $m_5 = 1$  für einen geringen Mäandrierungsgrad des Gewässers in diesem Bereich

Somit gilt für den STRICKLER-Beiwert nach COWAN:

$$n = (0,026 + 0,005 + 0 + 0 + 0,014) \cdot 1 = 0,045$$

$$k_{st} = 1/n \approx 22 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$$

Der mit der GMS-Formel berechnete Abfluss beträgt bei diesem  $k_{st}$ -Wert etwa  $Q \approx 62 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 5.2.3 Berechnung nach SELLIN

Die Berechnung nach SELLIN (1964) kommt bei gegliederten Gerinnen zum Einsatz. In *gegliederten Gerinnen* sind die Fließgeschwindigkeiten in den Teilquerschnitten voneinander sehr verschieden. In den Berührungsbereichen bilden sich energieverzehrende Wirbel aus, die einerseits die Abflussleistung im tiefen Teilquerschnitt vermindern und andererseits im flachen Teilquerschnitt erhöhen [9].

**Hier ist zu beachten, dass sich besonders der  $k_{st}$ -Wert der Vorländer mit der Wassertiefe ändert.**

Bei sehr geringen Wassertiefen auf den Vorländern kommt es zu einer erheblichen Zunahme der Rauheit, so dass dort kaum noch ein bemerkenswerter Abfluss zu erwarten ist [6]. Von großer Bedeutung ist dabei die abflussreduzierende Wirkung des Böschungs- und Vorlandbewuchses. Der äquivalente  $k_{st}$ -Wert verändert sich mit der Wassertiefe bzw. dem Abfluss. In folgender Abbildung sind der Verlauf des  $k_{st}$ -Wertes und die Abflusskurve skizzenhaft dargestellt.

**Abbildung 63 ist in fünf Wasserstands-Zonen unterteilt:**

- Zone 1: Bei **Niedrigwasser** findet der Abfluss fast ausschließlich im Sohlsubstrat statt. Der  $k_{st}$ -Wert ist aufgrund der signifikanten Sohlrauheit sehr klein. Eine vereinfachte hydraulische Berechnung mit der GMS-Formel ist hier zu ungenau.
- Zone 2: Der **mittlere Abfluss** findet im unbewachsenen Gewässerbett statt. Aufgrund der gleichbleibenden Böschungsrauheit wird bei zunehmender Wassertiefe der Einfluss der groben Sohlstruktur schwächer, was eine Zunahme des Gesamt- $k_{st}$ -Wertes zur Folge hat.
- Zone 3: Die Gerinnerauheit nimmt nun infolge des **durchströmten rechtsseitigen Böschungsbewuchses** stärker zu. Der  $k_{st}$ -Verlauf in diesem Bereich wird steiler (im Bild übertrieben dargestellt), weil trotz zunehmender Wassertiefe sich die Wandrauheit signifikant abflussmindernd auswirkt.
- Zone 4: Der Abfluss findet jetzt im **Hauptbett und auf dem rechten Vorland** statt. Da zu Beginn der Ausuferung das Vorland nur gering überflutet ist, muss dort lokal ein sehr kleiner  $k_{st}$ -Wert (entsprechend einer großen

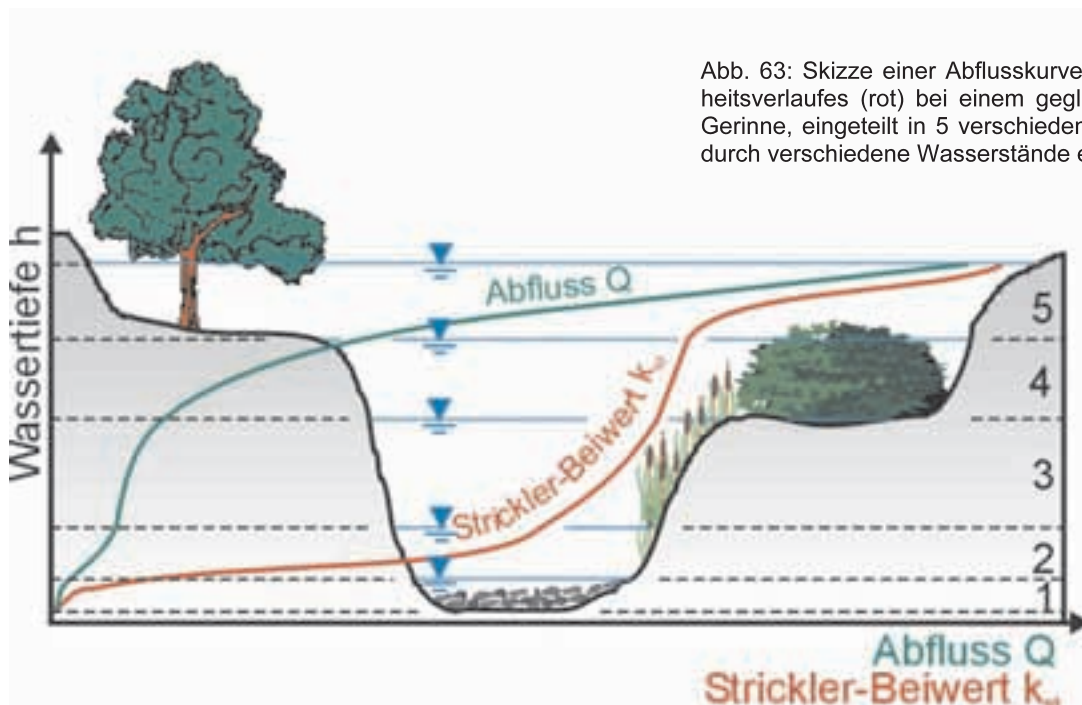


Abb. 63: Skizze einer Abflusskurve (grün) und eines Rauheitsverlaufes (rot) bei einem gegliederten, bewachsenen Gerinne, eingeteilt in 5 verschiedenen Zonen, welche sich durch verschiedene Wasserstände ergeben.

Rauheit) angesetzt werden. Der im Vorland befindliche Bewuchs (z.B. Weiden) sorgt darüber hinaus für eine weitere Abflussbehinderung, die selbst bei größeren Überflutungshöhen im  $k_{st}$ -Wert berücksichtigt werden muss. Aus diesem Grund bleibt der  $k_{st}$ -Verlauf in dieser Zone steil.

Der Verlauf der Abflusskurve flacht hier ab. Dies ist durch die plötzliche starke Zunahme der durchflossenen Querschnittsfläche zu erklären. Aufgrund der großen Vorlandbreite wächst bei zunehmender Wassertiefe die Fläche  $A$  schneller an als bei der Hauptbettströmung in den Zonen 1 bis 3

$$(A_{\text{Hauptbett}} \ll A_{\text{Hauptbett+Vorland}}).$$

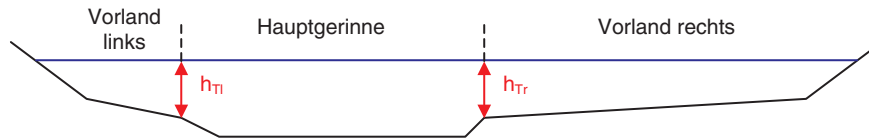
- Zone 5: **Beide Vorländer werden nun deutlich überströmt.** Der Bewuchs des rechten Vorlandes ist komplett überflossen und schmiegt sich der Strömung an, was zu einer Verminderung des Formwiderstandes führt. Der Verlauf des  $k_{st}$ -Wertes wird zusätzlich noch durch die Rauheit des linken Vorlandes geprägt.

SELLIN hat durch hydraulische Modellversuche herausgefunden, dass man bei einer Abflussberechnung mit der GMS-Formel die größte Genauigkeit erhält, wenn man den Abfluss „getrennt“ berechnet. Im Ablaufdiagramm auf der folgenden Seite ist das Verfahren dargestellt.

## Fallunterscheidung nach SELLIN für gegliederte Gerinne

### Eingangsgrößen:

$b_{Sp}$	Wasserspiegelbreite in m
$k_{st,F}, k_{st,VI}, k_{st,Vr}$	Rauheitsbeiwerte im Hauptgerinne und auf den Vorländern in $m^{1/3}/s$
$I_{So}$	Neigung der Sohle
$h_{Tl}, h_{Tr}$	Höhe der Trennflächen zwischen Hauptgerinne und Vorländer links bzw. rechts in m



### Ermitteln der durchflossenen Querschnittsflächen $A_i$ in $m^2$ :

→siehe Berechnungsablauf in Kap. 4.1

### Ermitteln der benetzten Teilumfänge $l_{u,i}$ in m:

→siehe Berechnungsablauf in Kap. 4.1

### Ermitteln der Trennflächenhöhen $h_{Tl}$ und $h_{Tr}$ in m:

→Anhand der oben gezeigten Abbildung

### Bestimmung des hydraulischen Radius und benetzten Umfanges des Hauptgerinnes nach SELLIN:

$$U_* = h_{Tl} + h_{Tr}$$

$$r_{hy,F} = \frac{A_F}{l_{U,F} + U_*}$$

$A_F$  = durchflossene Fläche im Hauptbett in  $m^2$

$U_F$  = benetzter Umfang im Hauptbett in m

### Bei Zonen verschiedener Rauheiten in den einzelnen Gerinneabschnitten:

Bestimmung der äquivalenten Rauheiten der Vorländer ( $k_{st,VI}$  und  $k_{st,Vr}$ ) sowie des Hauptgerinnes ( $k_{st,F}$ ) nach EINSTEIN/HORTON (Kap. 5.2.2).

### Gegliederte Berechnung: $Q_{ges} = Q_F + Q_{VI} + Q_{Vr}$

mit  $r_{hy,F}$  aus obiger Berechnung zur Abflussermittlung im Hauptgerinne und nach Kap. 5.3.2



### 5.3 Verfahren zur Abflussberechnung auf Grundlage der GMS-Formel

In diesem Kapitel werden drei gängige Verfahren vorgestellt, mit denen eine vereinfachte hydraulische Berechnung des Abflusses durchgeführt werden kann. Grundlage dabei ist immer die GMS-Formel.

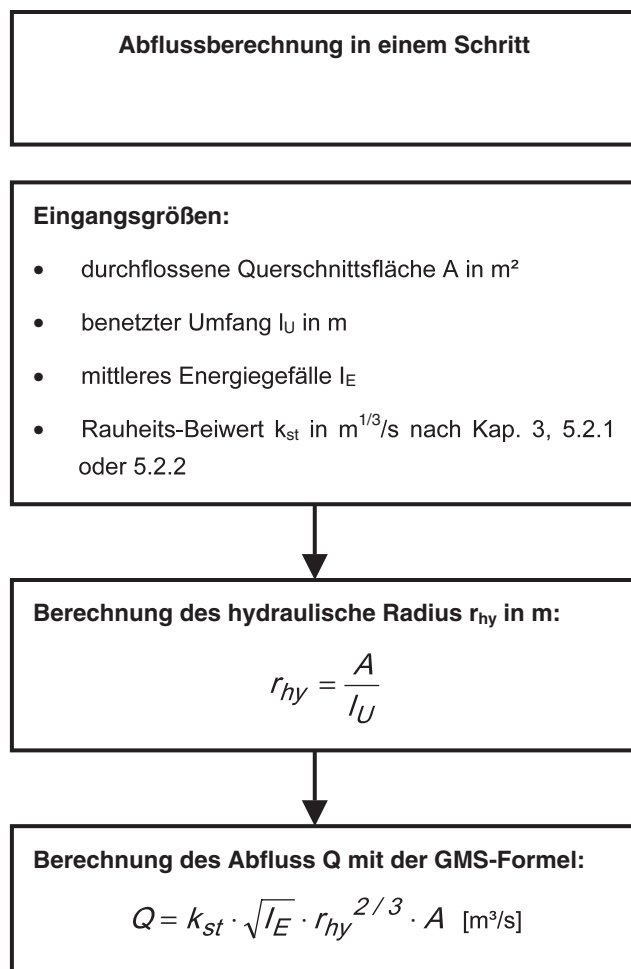
Voraussetzung zur Anwendung der Verfahren ist, dass die  $k_{st}$ -Werte bereits geschätzt bzw. ermittelt wurden (siehe Kap. 5.2).

#### 5.3.1 Berechnung in einem Schritt

Die Berechnung in einem Schritt erfolgt, wenn für das Gerinne nur eine Rauheit angenommen wird (z.B. betonierter Triebwasserkanal).

Dies ist auch nach einer „Wichtung“ mehrerer Rauheiten mit dem Verfahren nach EINSTEIN/HORTON (vgl. Kap. 5.2.2) der Fall.

Im nachfolgenden Verlaufdiagramm ist der Berechnungsablauf dargestellt.



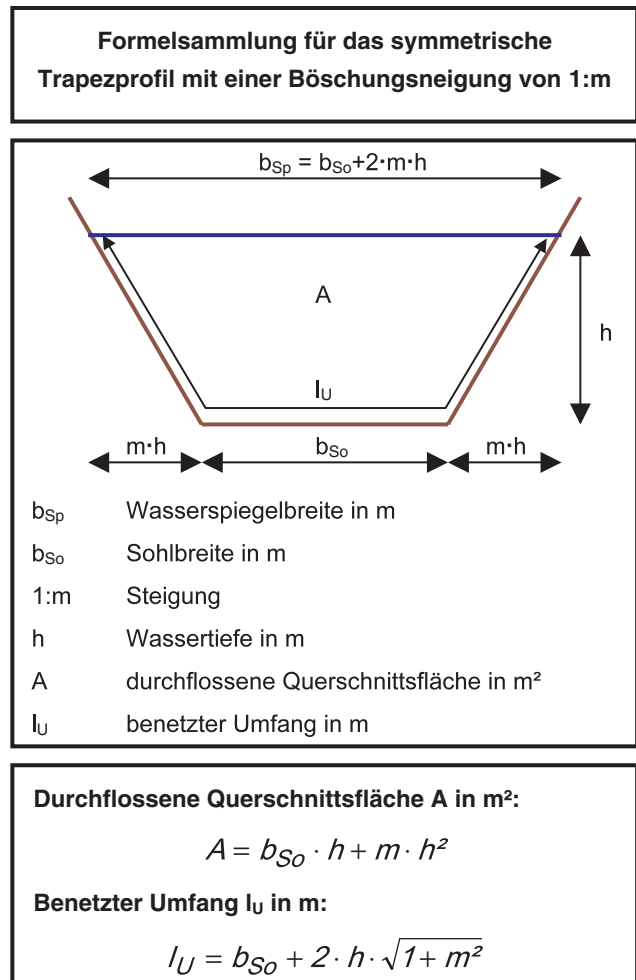
#### Beispiel 12

Im Zuge einer Umgestaltung eines alten Triebwasserkanals soll dessen momentane Abflussleistungsfähigkeit bestimmt werden.



Abb. 64: Momentaner Zustand des alten Triebwasserkanals. Böschungen und Sohle bestehen aus Asphaltbeton. Die Querschnittsgeometrie ist trapezförmig.

Die charakteristischen Querschnittskennwerte ( $A$  und  $l_U$ ) können bei Trapezprofilen nach folgenden Formeln berechnet werden:



Die Sohlbreite  $b_{So}$  beträgt 6 m. Die Böschungsneigung beträgt 1:m = 1:1 und der Abstand von Böschungsoberkante bis zur Sohle wird mit 3,50 m gemessen. Abzüglich 0,5 m Freibord kann die Wassertiefe im Kanal demnach  $h_{max} = 3,0$  m betragen.

- $A = b_{So} \cdot h_{max} + m \cdot h_{max}^2 = 27 \text{ m}^2$
- $I_U = b_{So} + 2 \cdot h_{max} \cdot (1 + m^2)^{0,5} \approx 14,5 \text{ m}$
- $r_{hy} = A / I_U = 1,86 \text{ m}$

Aufgrund der trapezförmigen Querschnittsgeometrie handelt es sich hierbei um ein kompaktes Gerinne. Da Sohle und Böschungen aus dem selben Material bestehen, kann hier für den gesamten Querschnitt derselbe STRICKLER-Beiwert angenommen werden.

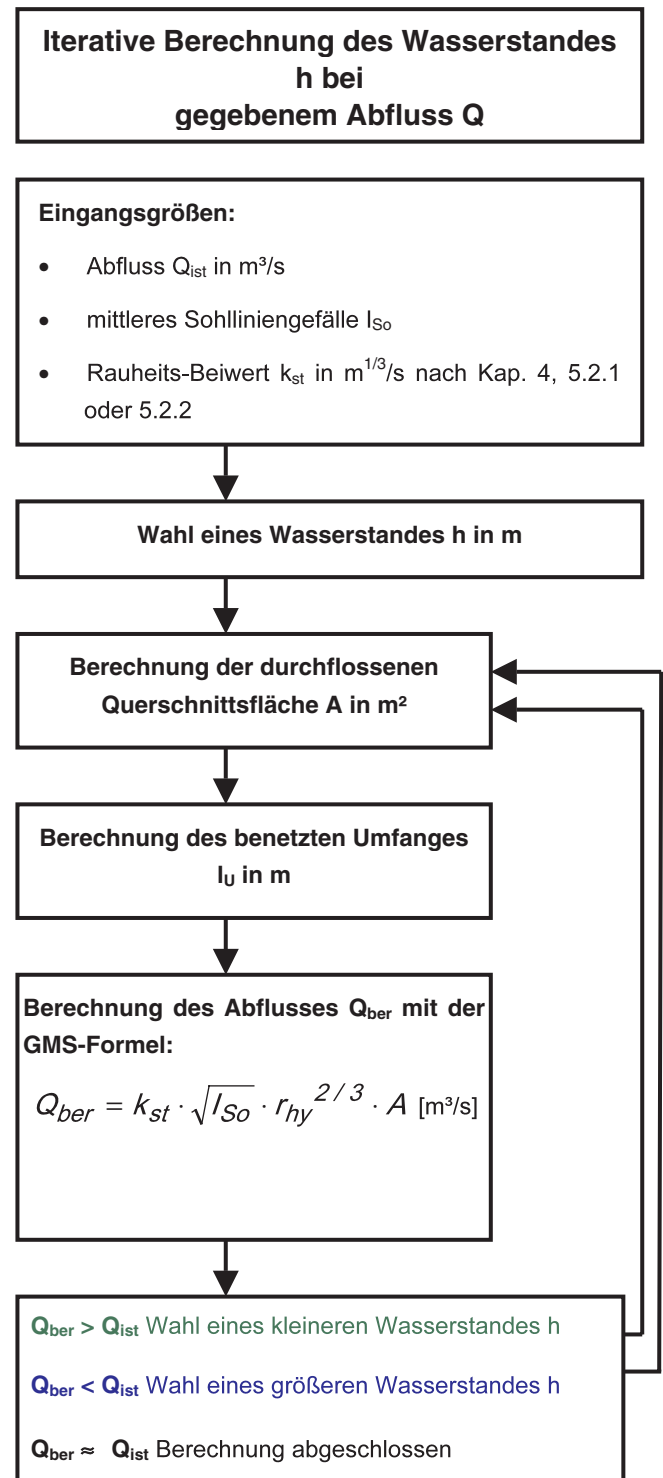
Nach Kap. 3 wird der in der Literatur für „Werkkanäle aus Asphaltbeton“ vorgeschlagene STRICKLER-Beiwert von  $k_{st} = 77 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  gewählt.

Für die Berechnung wird die Annahme gemacht, dass sich im betrachteten Querschnitt gleichförmig-stationärer Abfluss einstellt (sog. „Normalabfluss“) Somit kann anstelle des Energieliniengefälles das mittlere Sohlprofilgefälle in die GMS-Gleichung eingesetzt werden.

Das mittlere Sohlprofilgefälle beträgt  $I_{So} = 0,0005 \text{ m/m}$ . Damit berechnet sich durch Anwendung der GMS-Formel der maximale Abfluss zu:

$$Q_{max} = k_{st} \cdot I_{So}^{0,5} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot A \approx 70 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Die mittlere Fließgeschwindigkeit beträgt dabei  $v \approx 2,59 \text{ m/s}$  (mit  $Fr = 0,47$  stellt sich also strömender Abfluss ein).



Eine **Berechnung des Wasserstandes bei gegebenem Abfluss** wird iterativ durchgeführt.

Als Eingangswert wird dabei zunächst ein Wasserstand angenommen. Damit werden dann die durchflossene Querschnittsfläche, der benetzte Umfang sowie der hydraulische Radius berechnet.

Durch Anwendung der GMS-Formel kann damit ein Abfluss berechnet werden. Stimmt der berechnete Abfluss nicht mit dem gegebenen Abfluss überein, so ist ein neuer Wasserstand zu wählen, und die Berechnung erneut durchzuführen (vgl. Verlaufsdiagramm).

### Beispiel 13

In Anlehnung an Beispiel 12 soll nun der Wasserstand im alten Triebwasserkanal für einen Durchfluss von  $Q_{\text{ist}} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$  ermittelt werden.

Alle zur Berechnung benötigten Werte können aus Beispiel 12 übernommen werden:

Auf Grundlagen von Kap. 3 wird der in der Literatur für „Werkkanäle aus Asphaltbeton“ vorgeschlagene STRICKLER-Beiwert von  $k_{\text{st}} = 77 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  gewählt.

Die Sohlbreite  $b_{\text{So}}$  beträgt 6 m. Die Böschungeneigung beträgt 1:m = 1:1. Das mittlere Sohlliniengefälle beträgt  $I_{\text{So}} = 0,0005 \text{ m/m}$ .

Die Berechnung wird nun iterativ solange durchgeführt, bis der berechnete Abfluss  $Q_{\text{ber}}$  ungefähr gleich dem gegebenen Abfluss  $Q_{\text{ist}}$  ist.

1. Iterationsschritt: Wähle  $h = 2,00 \text{ m}$

$$A = 16 \text{ m}^2, l_U = 11,66 \text{ m}, r_{hy} = 1,37 \text{ m}$$

$$Q_{\text{ber}} = 34,03 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{\text{ist}} \rightarrow h \text{ größer wählen!}$$

2. Iterationsschritt: Wähle  $h = 2,50 \text{ m}$

$$A = 21,3 \text{ m}^2, l_U = 13,07 \text{ m}, r_{hy} = 1,63 \text{ m}$$

$$Q_{\text{ber}} = 50,6 \text{ m}^3/\text{s} > Q_{\text{ist}} \rightarrow h \text{ kleiner wählen!}$$

3. Iterationsschritt: Wähle  $h = 2,25 \text{ m}$

$$A = 18,6 \text{ m}^2, l_U = 12,36 \text{ m}, r_{hy} = 1,5 \text{ m}$$

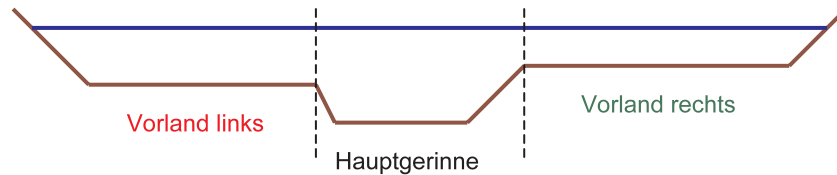
$$Q_{\text{ber}} = 41,8 \text{ m}^3/\text{s} \approx Q_{\text{ist}} \rightarrow h \text{ richtig gewählt!}$$

Bei einem Abfluss von  $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$  wird sich im Triebwasserkanal eine Wassertiefe von ca. 2,25 m einstellen. Die mittlere Fließgeschwindigkeit beträgt dabei  $v \approx 2,24 \text{ m/s}$  ( $Fr = 0,48$ ).

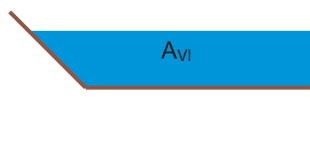
### Abflussberechnung bei gegliederten Gerinnen (gegliederte Berechnung)

#### Eingangsgrößen:

Gegliedertes Profil mit Vorländern (Index V und I bzw. r für links und rechts) und Hauptgerinne (Index F), mittleres Sohlprofilgefälle  $I_{s0}$



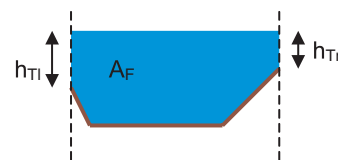
#### Linkes Vorland:



Berechnung der geometrischen Kenngrößen (siehe Kap. 4.1):

$A_{VI}$  Fläche in  $m^2$   
 $I_{U,VI}$  benetzter Umfang in m

#### Hauptgerinne:



Berechnung der geometrischen Kenngrößen (siehe Kap. 4.1):

$A_F$  Fläche in  $m^2$   
 $I_{U,F}$  benetzter Umfang in m  
 $h_{TI}, h_{Tr}$  Trennflächen li/re in m

#### Rechtes Vorland:



Berechnung der geometrischen Kenngrößen (siehe Kap. 4.1):

$A_{Vr}$  Fläche in  $m^2$   
 $I_{U,Vr}$  benetzter Umfang in m

#### Berechnung nach SELLIN

- Anwenden des Verlaufdiagrammes aus Kap. 5.2.3
- Bestimmung des zusätzlichen Umfanges  $U^*$  nach SELLIN (siehe Verlaufdiagramm Kap. 5.2.3) und des hydr. Radius  $r_{hy,F}$  des Hauptgerinnes.

*Wenn notwendig:*

Bestimmung einer äquivalenten Rauheit  $k_{st,VI}$  für das linke Vorland nach EINSTEIN/HORTON

*Wenn notwendig:*

Bestimmung einer äquivalenten Rauheit  $k_{st,F}$  für das Hauptgerinne nach EINSTEIN/HORTON.

*Wenn notwendig:*

Bestimmung einer äquiv. Rauheit  $k_{st,Vr}$  für das rechte Vorland nach EINSTEIN/HORTON

#### Berechnung der Teilabflüsse in den einzelnen Querschnittsabschnitten:

linkes Vorland:  $Q_{VI} = k_{st,VI} \cdot \sqrt{I_E} \cdot r_{hy,VI}^{2/3} \cdot A_{VI}$  in  $m^3/s$ , mit  $r_{hy,VI} = A_{VI} / I_{U,VI}$

rechtes Vorland:  $Q_{Vr} = k_{st,Vr} \cdot \sqrt{I_E} \cdot r_{hy,Vr}^{2/3} \cdot A_{Vr}$  in  $m^3/s$ , mit  $r_{hy,Vr} = A_{Vr} / I_{U,Vr}$

Hauptgerinne:  $Q_F = k_{st,F} \cdot \sqrt{I_E} \cdot r_{hy,F}^{2/3} \cdot A_F$  in  $m^3/s$ , mit  $r_{hy,F} = A_F / (I_{U,F} + U^*)$  nach SELLIN

#### Berechnung des gesamten Abflusses:

$$Q = Q_{VI} + Q_{Vr} + Q_F \text{ in } m^3/s$$



### 5.3.2 Gegliederte Berechnung

Bei gegliederten Gerinnen, muss der Abflussanteil auf den Vorländern und im Hauptgerinne separat berechnet werden.

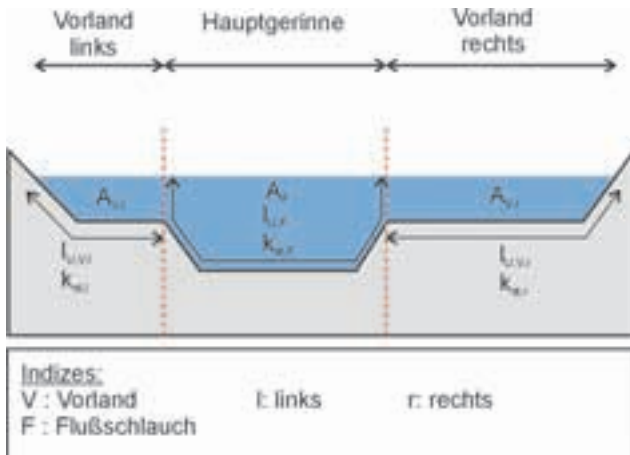


Abb. 65: Prinzipskizze der Aufteilung eines gegliederten Gerinnes in die Teilquerschnitte Vorland links, Flußschlauch und Vorland rechts. Jeder dieser Teilquerschnitte wird bei entsprechendem Wasserstand durchflossen. Der Gesamtabfluss ergibt sich aus der Summe der Abflüsse durch die Teilquerschnitte.

Der gegliederte Querschnitt wird zunächst in mehrere Teile aufgeteilt. Jedem Teilquerschnitt wird dann ein STRICKLER-Beiwert zugeordnet und damit der Abfluss durch den betrachteten Teilquerschnitt berechnet. **Die Trennungslinien werden dabei nach SELLIN jeweils zum benetzten Umfang des Flußschlauches addiert ( $l_{U,F}$  in Abb. 65).**

Der Gesamtabfluss  $Q$  berechnet sich aus der Summe der mit Hilfe der GMS-Formel ermittelten Teilabflüsse.

$$Q = \sum Q_i = \sum \left( k_{st,i} \cdot r_{hy,i}^{2/3} \cdot \sqrt{I_E} \cdot A_i \right) \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (20)$$

- $Q$  :Gesamtabfluss in  $\text{m}^3/\text{s}$
- $Q_i$  :Abfluss im Teilquerschnitt  $i$  in  $\text{m}^3/\text{s}$
- $k_{st,i}$  :STRICKLER-Beiwert für Teilquerschnitt  $i$  in  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$
- $A_i$  :durchflossene Teilquerschnittsfläche  $i$  in  $\text{m}^2$
- $l_{U,i}$  :benetzter Umfang im Teilquerschnitt  $i$  in  $\text{m}$
- $r_{hy,i}$  :hydr. Radius im Teilquerschnitt  $i$  ( $=A_i/l_{U,i}$ ) in  $\text{m}$
- $I_E$  :mittleres Energieliniengefälle ( $=I_{s0}$  bei gleichförmigen Abflussbedingungen)



Abb. 66:  
Die Murr im Bereich der Gemarkung Steinheim in Fließrichtung aufgenommen. Man erkennt die grasbewachsenen Vorländer, welche beim Hochwasserereignis deutlich überströmt waren.

**Beispiel 14**

Analog zum Beispiel 11 (für kompakte Gerinne) soll nun ein Hochwasserereignis durch hydraulische Berechnung in einem Murr-Abschnitt mit gegliedertem Gerinne nachgerechnet werden.

Dazu wurde während des Abflussereignisses ein Wasserstand von 201,20 m+NN gemessen. Die Vorländer waren dabei deutlich überströmt, die Büsche und Bäume im oberen Böschungsbereich waren jedoch noch nicht vom Abflussgeschehen betroffen.

Das Gerinne wurde vermessen und der für die Berechnung relevante Wasserspiegel eingetragen.

Für die hydraulische Berechnung wird vereinfachend von gleichförmigen Abflussbedingungen ausgegangen. Damit kann anstelle des Energie- liniengefälles das mittlere Sohl- liniengefälle in die GMS-Formel eingesetzt werden. Dieses beträgt laut Vermessung  $I_{so} = 0,0012$ .

Gemäß dem eingangs gezeigten Verlaufsdia- gramm wird in Abb. 67 der Querschnitt nach Vorländern (Index V) und Flussschlauch (Index F) unterteilt. Die Böschungen zwischen Fluss- schlauch und Vorländer sind zum Zeitpunkt des zu untersuchenden Abflussereignisses ebenso wie die Vorländer homogen mit Gras bewach- sen.

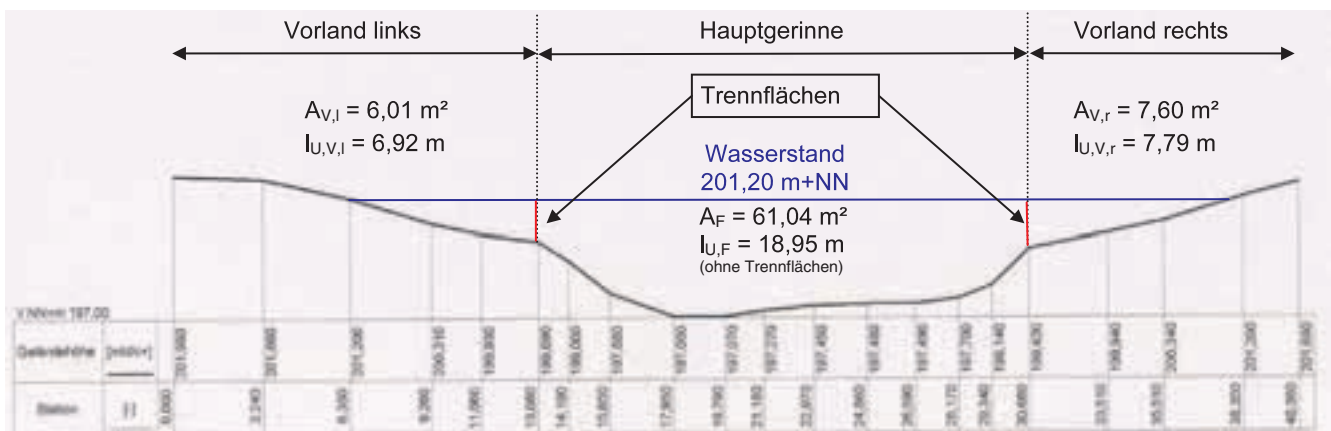


Abb. 67: Vereinfachte Darstellung des für die Berechnung repräsentativen vermessenen Murr-Querschnittes.

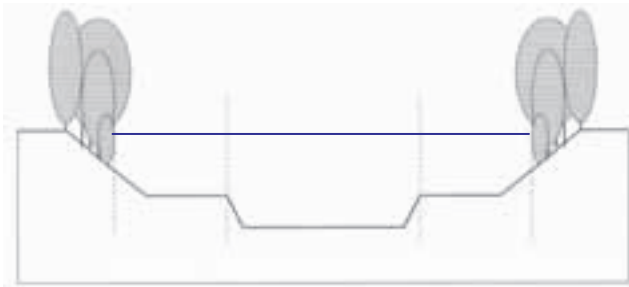


Abb. 68: Idealisierung der hydraulischen Situation.

Zuerst wird nach SELIN der hydraulische Radius des Hauptgerinnes berechnet. Dazu wird das Verlaufsdiagramm aus Kap. 5.2.3 verwendet. Im Anschluss daran wird dann die gegliederte Berechnung durchgeführt.

Es gelten folgende Eingangsgrößen:

- Wasserspiegelbreite:

$$\text{Gesamt: } b_{Sp} = 31,90 \text{ m}$$

- Höhe der Trennflächen (vgl. Abb. 5.28)

$$\text{links: } h_{Tl} = 1,51 \text{ m}$$

$$\text{rechts: } h_{Tr} = 1,78 \text{ m}$$

- Durchflossene Querschnittsflächen und benetzter Umfang:

$$\text{Gesamt: } A = 74,65 \text{ m}^2$$

$$l_U = 33,66 \text{ m}$$

$$\text{linkes Vorland: } A_{V,l} = 6,01 \text{ m}^2$$

$$l_{U,V,l} = 6,91 \text{ m}^2$$

$$\text{Hauptgerinne: } A_F = 61,04 \text{ m}^2$$

$$l_{U,F} = 18,95 \text{ m}$$

$$\text{rechtes Vorland: } A_{V,r} = 7,60 \text{ m}^2$$

$$l_{U,V,r} = 7,79 \text{ m}$$

- Bestimmung des hydraulischen Radius und benetzten Umfanges im Hauptgerinne nach SELIN:

$$\begin{aligned} U_* &= h_{Tl} + h_{Tr} \\ &= 1,51 + 1,78 \\ &= 3,29 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{hy,F} &= \frac{A_F}{l_{U,F} + U_*} \\ &= \frac{61,04}{18,95 + 3,29} \\ &= 2,74 \text{ m} \end{aligned}$$

Nun wird mit dem Verlaufsdiagramm für die gegliederte Berechnung aus Kap. 5.3.2 fortgefahren:

- Bestimmung der Rauheitsbeiwerte :

Für die grasbewachsenen überströmten Vorländer wird gemäß Kap. 3 ein STRICKLER-Beiwert von  $k_{st,V,l} = k_{st,V,r} = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  angenommen.

Das Hauptgerinne besteht aus Geröll, Schlamm und Unregelmäßigkeiten. Nach Kap. 3 wird hierfür ein  $k_{st}$ -Wert von  $k_{st,F} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  angenommen.

Eine Rauheitsüberlagerung nach EINSTEIN/HORTON in den einzelnen Abschnitten kann aufgrund der homogenen Rauheiten entfallen.

- Berechnung der Teilabflüsse in den einzelnen Querschnittsabschnitten:

→ linkes Vorland:

$$\begin{aligned} Q_{Vl} &= k_{st,V,l} \cdot \sqrt{I_{So}} \cdot r_{hy,V,l}^{2/3} \cdot A_{V,l} \\ &= 25 \cdot \sqrt{0,0012} \cdot 0,87^{2/3} \cdot 6,01 \\ &\approx 4,70 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

mit  $v_{Vl} = 0,78 \text{ m/s}$

→ rechtes Vorland:

$$\begin{aligned} Q_{Vr} &= 25 \cdot \sqrt{0,0012} \cdot 0,98^{2/3} \cdot 7,60 \\ &\approx 6,50 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

mit  $v_{Vr} = 0,86 \text{ m/s}$

→ Hauptgerinne:

$$\begin{aligned} Q_F &= 30 \cdot \sqrt{0,0012} \cdot 2,74^{2/3} \cdot 61,04 \\ &\approx 124 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

mit  $v_F = 1,80 \text{ m/s}$

- Berechnung des gesamten Abflusses:

$$\begin{aligned} Q &= Q_{Vl} + Q_{Vr} + Q_F \\ &= 4,70 + 6,50 + 124 \\ &\approx 135 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Auch bei diesem Beispiel fällt auf, wie entscheidend die Wahl der  $k_{st}$ -Werte für das Berechnungsergebnis ist. Hier muss je nach Abflussleistung die hydraulische Situation sorgfältig abgeschätzt werden. Anhand der berechneten Fließgeschwindigkeiten lassen sich gut die Strömungsunterschiede im Hauptgerinne und auf den Vorländern erkennen.

### 5.3.3 Flächenabzugsverfahren

**Das Flächenabzugsverfahren kommt bei stark gehölzbestandenen Gewässern zum Einsatz.** Dabei ist das Verfahren unabhängig vom Gerinnetyp (kompaktes Gerinne, gegliedertes Gerinne) einsetzbar.

Besonders bei natürlichen bzw. naturnahen Fließgewässern wird es oft erforderlich, den an das Mittelwasserbett angrenzenden Bewuchs in der hydraulischen Berechnung zu berücksichtigen.

Die abflussreduzierende Auswirkung von Böschungsbewuchs wird bei diesem Verfahren daher besonders berücksichtigt, indem schlecht durchströmte Bereiche vom Fließquerschnitt „abgezogen“ und ein zusätzlicher benetzter Umfang mit festgelegten Rauheiten hinzugerechnet wird (siehe Abb. 69).

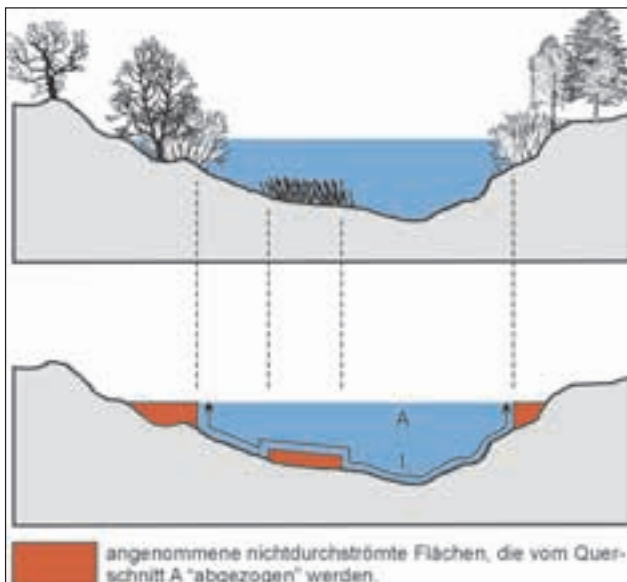


Abb. 69: Aufarbeiten eines gehölzbestandenen Querschnittes für eine hydraulische Berechnung.

Die roten Flächen werden als nicht durchströmt angenommen und müssen deshalb vom tatsächlichen Abflussquerschnitt abgezogen werden. Man erhält so für die Berechnung den „abflusswirksamen Querschnitt“ A. Bei der Bestimmung des benetzten Umfanges werden die ausgegrenzten Flächen umfahren.

Der Grundgedanke beim Flächenabzugsverfahren geht davon aus, dass in den bewachsenen Abschnitten eines Gerinnes das Wasser kaum fließt. Daher sind Teile des Abflussquerschnittes, die bewachsen sind, von der durchströmten Querschnittsfläche abzuziehen. Die seitlichen Begrenzungen des Bewuchses sind bei der Er-

mittlung des benetzten Umfanges zu berücksichtigen, da sie als Reibungsflächen die Strömung zusätzlich beeinflussen.

Einzelstehende Bäume werden nur durch Abzug ihrer Bewuchsfläche vom Abflussquerschnitt berücksichtigt. Ihr Einfluss auf den Abfluss ist damit ausreichend erfasst.

Durch die Vernachlässigung des Abflussanteiles der Bewuchsdurchströmung wird auch die möglicherweise stattfindende „Verlegung“ des Bewuchses durch Treibgut und Geschwemmsel berücksichtigt (vgl. Kap. 4.2). Ebenso müssen zu erwartende Verlandungen - vor allem im Vorlandbereich - durch einen Abzug bei der Querschnittsfläche berücksichtigt werden.

Ein wesentliches Problem beim Flächenabzugsverfahren ist die richtige Annahme der Bewuchsfläche. Die Dichte des Bestandes spielt dabei ebenso eine Rolle, wie die Art des Bewuchses (Weichholz oder Hartholz).

Die Berechnung der Wasserspiegellage bzw. des Abflusses erfolgt mit der GMS-Formel. Der benetzte Umfang kann dabei entsprechend den verschiedenen Bewuchselementen unterteilt und mit verschiedenen STRICKLER-Werten beaufschlagt werden.

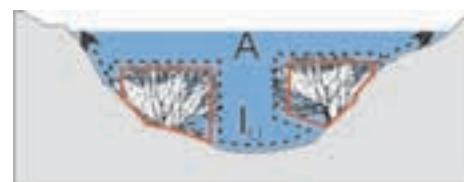
Bei der Bestimmung von durchströmter Querschnittsfläche, benetztem Umfang und der Rauheitsbeiwerte  $k_{st}$  sollte man daher die folgenden Kriterien beachten:

#### Bewuchsflächen unterhalb der Wasseroberfläche

Die maximalen Bewuchsflächen (Endzustand des Wachstums) unterhalb des Wasserspiegels werden bei der *Flächenberechnung* ganz abgezogen.

Die seitlichen Begrenzungen dieser Bewuchsflächen werden bei der Ermittlung des *benetzten Umfanges* mitgerechnet.

**Beachte:** Sonderfall „Jungweiden und Röhrichtbewuchs“

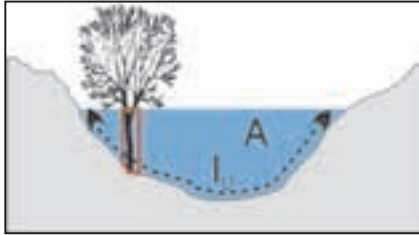




### Einzelstehende umströmte Elemente (z.B. Baumstämme)

Einzelstehende Elemente, die nur umströmmt werden, sich jedoch nicht vollkommen unterhalb der Wasseroberfläche befinden, werden nur bei der Ermittlung des wirksamen Abflussquerschnittes berücksichtigt (abgezogen).

Bei der Ermittlung des benetzten Umfanges werden diese Elemente nicht berücksichtigt !



### In Fließrichtung angeordnete, durchgehende Baum- und starre Strauchreihen

In Fließrichtung angeordnete Baum- und starre Strauchreihen mit geringem Stammabstand sind als nicht durchströmbar anzunehmen und von der Querschnittsfläche abzuziehen.

### Sonderfall: Jungweiden und Röhrichtbewuchs unterhalb der Wasseroberfläche

Lässt sich das zu berechnende Abflussereignis jahreszeitlich genau einordnen, können beim Röhricht genauere Festlegungen der abflussbehindernden Fläche getroffen werden.

Im Frühjahr ist das *Röhricht* so biegsam, dass es sich bei Überflutung ganz umlegt. Der STRICKLER-Beiwert wird ähnlich dem von Gras angenommen (vgl. Kap. 3). Im Herbst und beginnenden Winter sind dagegen die Stängel steifer und neigen bei Überströmung zum Knicken. Die dazwischen liegenden Jahreszeiten sind als Übergänge zu betrachten.

Bei *Jungweiden und anderen biegsamen Weichholzarten* kommt es ebenfalls bei einer Überströmung zu einem „Umlegen“ des Bewuchses und damit zu einer Verminderung der Widerstandsfläche infolge des Anschmiegens der Äste an die Strömung.

Die durch diesen Bewuchs hervorgerufenen Abflusswiderstände werden dadurch berücksichtigt, dass  $\frac{1}{3}$  der maximalen Wuchshöhe bei der Flächenberechnung abgezogen wird.

Im Allgemeinen werden die horizontalen und vertikalen Trennflächen desselben Gehölzes auch mit denselben  $k_{st}$ -Werten veranschlagt.

Nachfolgend wird in einem Verlaufdiagramm der Arbeitsablauf bei einer hydraulischen Be-

rechnung mit dem Flächenabzugsverfahren noch einmal aufgezeigt.

### Flächenabzugsverfahren

#### Eingangsgrößen:

- Querschnittsgeometrie (vgl. Kap. 4)
- Bewuchscharakteristik im Querschnitt (vgl. Kap. 4)
- Wasserstand oder Abfluss
- mittleres Energie- oder Sohl liniengefälle  $I_{S_0}$

#### Berechnung der abflusswirksamen Querschnittsfläche A:

- Festlegen der nichtdurchströmten Teilbereiche anhand der Bewuchscharakteristik
- Eintragen der nichtdurchströmten Teilbereiche in die Querschnittsgeometrie und Berechnen der nichtdurchströmten Flächen
- Berechnung der abflusswirksamen Querschnittsfläche **A** durch subtrahieren der nichtdurchströmten Flächen von der gesamten Fläche.

#### Festlegen der Rauheiten und benetzten Umfänge:

- Einteilen der benetzten Wandungen des abflusswirksamen Querschnittes in Zonen verschiedener Rauheiten
- Ermitteln der benetzten Umfänge  $I_u$
- Ermitteln einer äquivalenten Rauheit für den abflusswirksamen Querschnitt nach dem Verfahren von EINSTEIN/HORTON (vgl. Kap. 5.2.2) bzw. **bei gegliederter Gerinnegeometrie**: Ermitteln einer äquivalenten Rauheit für einen Teilbereich des Querschnittes (z.B. Vorland) nach dem Verfahren von EINSTEIN/HORTON.

#### Berechnung des Abfluss bzw. iterative Berechnung des Wasserstandes:

- Anwendung des entsprechenden Verfahrens:
  - bei kompakten Gerinnen: Berechnung in einem Schritt (vgl. Kap. 5.3.1)
  - bei gegliederten Gerinnen: Verfahren nach SELLIN und gegliederte Berechnung (Kap.5.3.2)



### Beispiel 16

Ein Bachabschnitt innerhalb einer Ortslage wurde naturnah umgestaltet. Dabei blieb das ursprüngliche Kastenprofil des Baches erhalten und die Sohle wurde durch den Einbau von Bewuchselementen, Störsteinen, Bermen und Riegeln naturnah umgestaltet.



Abb. 72: Der Bach in der Ortslage mit kastenförmigem künstlichem Gewässerbett.



Abb. 73: Der selbe Bach etwas stromab mit naturnah umgestalteter Sohle.

Durch den Einbau der verschiedenen Elemente in den Regelquerschnitt nimmt in diesem Bereich die Abflussleistung des Baches ab.

Eine vereinfachte hydraulische Berechnung ist hier mit den Flächenabzugsverfahren möglich. Im Beispiel soll damit die Berechnung der Leistungsfähigkeit des umgestalteten Regelquerschnittes vorgeführt werden.

#### □ Eingangsgrößen:

Querschnittsgeometrie: vgl. Abb. 74  
 Bewuchscharakteristik: vgl. Abb. 74  
 Wasserstand:  $h_{\max} = 2,00 \text{ m}$   
 Sohlprofilgefälle:  $I_{\text{So}} = 0,005$

#### □ Berechnung der abflusswirksamen Querschnittsfläche:

Anhand der in Abb. 74 eingetragenen und durchströmten Teilbereiche gilt:

$$A = 5,0 \cdot 2,0 - (0,8 \cdot 1,30 + 0,4 \cdot 0,70)$$

$$A = 8,68 \text{ m}^2$$

#### □ Festlegen der Rauheiten und benetzten Umfänge:

Für die Gerinnewände aus Mauerwerk wird  $k_{\text{st,Wand}} = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  angenommen (vgl. Kap. 3). Die Ränder der abgezogenen Bewuchsflächen werden aufgrund von Erfahrungen mit  $k_{\text{st,Bewuchs}} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  gewählt. Für die Sohle aus Geröll und feinem Substrat wird die Rauheit zu  $k_{\text{st,Sohle}} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  angenommen (vgl. Kap. 3).

Analog zur Aufteilung des Querschnittes in Zonen verschiedener Rauheiten werden nun die zugehörigen benetzten Umfänge ermittelt (vgl. Abb. 74):

$l_{\text{U, Wand, links}}$	= 1,20 m
$l_{\text{U, Bewuchs, links}}$	= 1,30 + 0,80 = 2,10 m
$l_{\text{U, Sohle}}$	= 3,00 m
$l_{\text{U, Bewuchs, rechts}}$	= 0,40 + 0,70 = 1,10 m
$l_{\text{U, Wand, rechts}}$	= 1,60 m

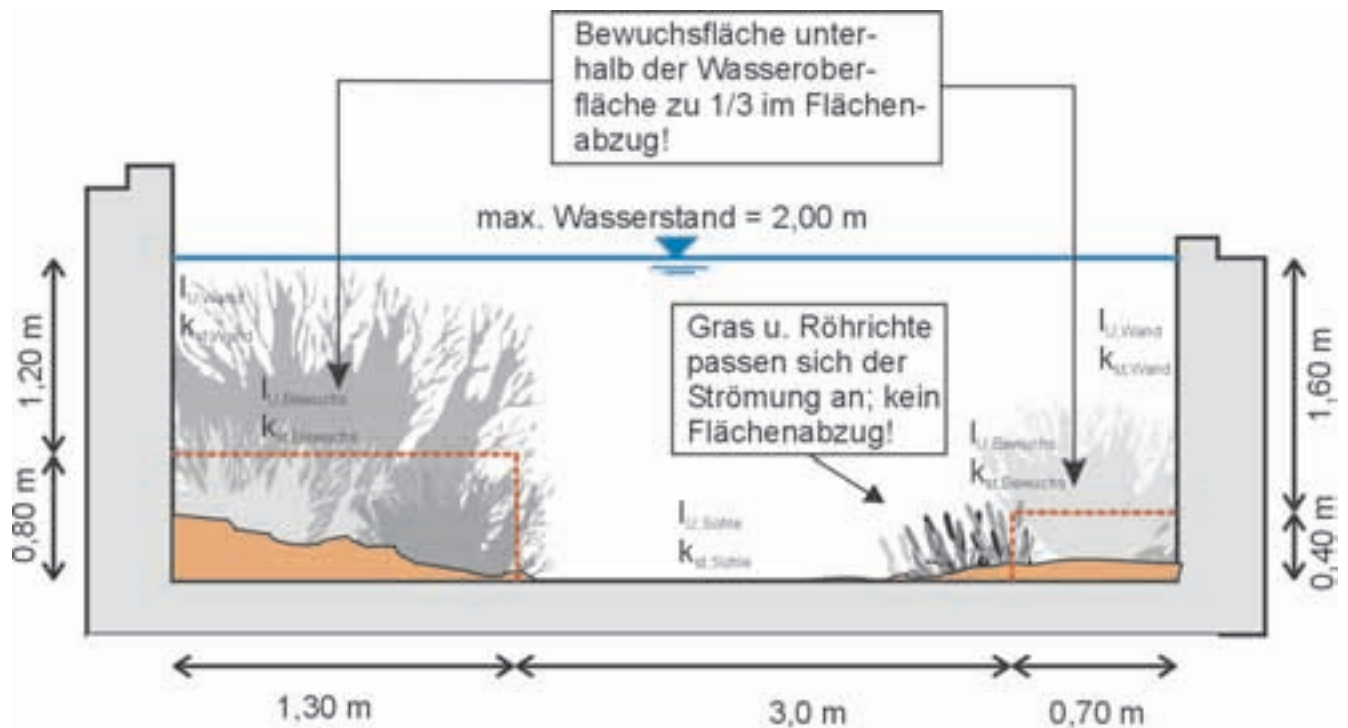


Abb. 74: Querschnittsskizze des Baches (ausgebautes Kastenprofil) mit eingetragenen Bewuchs und abgezogenen Teilflächen (rote Randlinie).

Damit kann nun nach dem Verfahren von EINSTEIN/HORTON (vgl. Kap. 5.2.2) die äquivalente Rauheit ermittelt werden:

$$k_{st} = \left( \frac{9,00}{\frac{1,20}{50^{1,5}} + \frac{2,10}{20^{1,5}} + \frac{3,00}{30^{1,5}} + \frac{1,10}{20^{1,5}} + \frac{1,60}{50^{1,5}}} \right)^{2/3} \approx 28 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$$

Eine Berechnung des Abflusses ohne die naturnahen Sohlumgestaltungsmaßnahmen ergibt einen Wert von  $Q \approx 27 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Damit ist bei diesem Beispiel der Einfluss des Bewuchses auf die Abflussleistung eines Gerinnes deutlich zu erkennen.

#### □ Berechnung des Abflusses:

Die Berechnung des Abflusses erfolgt mit der GMS-Formel in einem Schritt (vgl. Kap. 5.3.1). Damit gilt:

$$\begin{aligned} Q &= k_{st} \cdot \sqrt{I_{So}} \cdot \left( \frac{A}{l_U} \right)^{2/3} \cdot A \\ &= 28 \cdot \sqrt{0,005} \cdot \left( \frac{8,68}{9,00} \right)^{2/3} \cdot 8,68 \\ &\approx 17 \text{ m}^3 / \text{s} \end{aligned}$$



## 6. Beispiele

In diesem Kapitel sollen dem Anwender die bisher vorgestellten Berechnungsverfahren anhand von praxisnahen Beispielen vorgeführt werden.

Die Beispiele untergliedern sich wie folgt:

- 6.1 Dimensionierung eines Trapezquerschnittes für ein Verbindungsgewässer
- 6.2 Ermittlung der Abflusskurve bei einem unregelmäßigem Doppeltrapezprofil
- 6.3 Anwendung der Formblätter im Feldeinsatz: Abschätzung der Abflussleistung eines Baches
- 6.4 Vereinfachte Ermittlung von Überflutungsflächen für ein Bemessungshochwasser
- 6.5 Rekonstruktion eines Abflussereignisses anhand von Geschwemmsellinien
- 6.6 vereinfachte Wasserspiegellagenberechnung

Alle aufgeführten Beispiele entsprechen realen Daten und Ereignissen, so dass die Plausibilität der Zahlenwerte mit Naturmessdaten überprüft werden konnte.

Im Rahmen der Beispiele werden dem Leser die Verfahren zur Anwendung der GMS-Formel vorgestellt. Wichtig ist dabei, dass die Qualität der Berechnungsergebnisse aufgrund gemachter Annahmen und Schätzungen ggf. unzureichend sein kann, da zur Beschreibung komplexerer hydraulischer Situationen eine vereinfachte eindimensionale lokale Betrachtungsweise nicht ausreicht.

## 6.1 Dimensionierung eines Trapezquerschnittes für ein Verbindungsgewässer

Im Rahmen der Wiederherstellung der ökologischen Längsdurchgängigkeit eines Fließgewässers soll eine bestehende Wehranlage durch ein Verbindungsgewässer ergänzt werden. Das Verbindungsgewässer soll im Oberwasser oberhalb der Stauwurzel angeschlossen werden und im Unterwasser des Wehrs in den Fluss münden. Es gelten folgende Randbedingungen:

### ■ Konstruktive Bedingungen:

Wasserspiegeldifferenz zwischen Oberwasser und Unterwasser des Wehrs:  $\Delta h = 2,0$  m.

Die Stauwurzel liegt ca. 180 m oberhalb der Wehranlage.

Der Fließquerschnitt des Verbindungsgewässers kann vereinfacht als Trapezprofil angenähert werden. Die Böschungsneigung beträgt  $1:m = 1:2$ . Die Sohlbreite beträgt ca. 1,20 m.

Die Böschungen werden aus einer groben Steinschüttung angefertigt und entsprechend bepflanzt.

In das Verbindungsgewässer wird standortgemäßes Sohlsubstrat (Grobkies) eingebracht.

### ■ Ökologische Randbedingungen:

Die mittlere Fließgeschwindigkeit im Verbindungsgewässer darf nicht größer als 0,5 m/s sein. Die Strömung muss aufgelockert und Ruhezone müssen vorhanden sein.

Die mittlere Wassertiefe muss mindestens 0,4 m betragen.

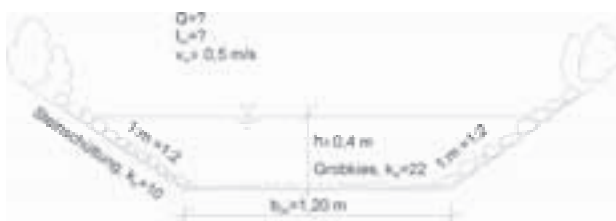


Abb. 75: Skizze des Querschnittes.

In einer groben Vorplanung soll u.a. die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Verbindungsgewässers überprüft werden. Dazu müssen folgende Aspekte durch eine vereinfachte hydraulische Berechnung untersucht werden:

1) Benötigte Abflussmenge im Verbindungsgewässer:

Laut Vorgabe soll die Wassertiefe mindestens 0,4 m betragen. Die Fließgeschwindigkeit darf dabei nicht größer als 0,5 m/s sein.

Nach der Kontinuitätsgleichung und der Formelsammlung für symmetrische Trapezprofile (Kap. 5.3.1) ergibt sich daraus folgende Abflussmenge:

$$Q = v \cdot A \text{ mit: } v = 0,5 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} A &= b_{So} \cdot h + m \cdot h^2 \\ &= 1,20 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,4^2 \\ &= 0,8 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

gilt:

$$Q = v \cdot A = 0,5 \cdot 0,8 = 0,4 \text{ m}^3/\text{s} = 400 \text{ l/s}$$

2) Länge des Verbindungsgewässers:

Durch Anwendung der GMS-Formel soll das mittlere Sohlgefälle bestimmt werden. Daraus soll dann die Talweglänge des Verbindungsgewässers abgeleitet werden.

Da es sich um einen Trapezquerschnitt mit unterschiedlichen Rauheitszonen handelt, kann der Berechnungsablauf für kompakte Gerinne mit einer Rauheitsüberlagerung nach EINSTEIN/HORTON angewandt werden (vgl. Verlaufsdiagramm Kap. 5).

Es ergeben sich folgende geometrische Kennwerte des Querschnittes:

$$A = 0,8 \text{ m}^2 \text{ (siehe unter 1)}$$

$$\begin{aligned} l_{U,ges} &= b_{So} + 2 \cdot h \cdot (1+m^2)^{0,5} \\ &= 1,20 + 2 \cdot 0,4 \cdot (1+2^2)^{0,5} \\ &\approx 3,00 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{U,Bö} &= l_{U,ges} - b_{So} \\ &= 3,00 - 1,20 \\ &= 1,80 \text{ m} \end{aligned}$$

Aufgrund der Literaturangaben aus Kap. 3 werden für das Verbindungsgewässer folgende STRICKLER-Beiwerte gewählt:

Sohle: Grobkies  
 $k_{st,So} \approx 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Böschungen: Steinschüttung, bewachsen  
 $k_{st,Bö} \approx 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Nach dem Verfahren von EINSTEIN/HORTON (Kap. 5.2.2) berechnet sich der äquivalente Rauheitsbeiwert zu:

$$k_{st,ges} = \left[ \frac{I_{U,ges}}{\frac{I_{U,Bö}}{k_{st,Bö}^{1,5}} + \frac{b_{So}}{k_{st,So}^{1,5}}} \right]^{3/2}$$

$$= \left[ \frac{3,00}{\frac{1,80}{10^{1,5}} + \frac{1,20}{22^{1,5}}} \right]^{3/2}$$

$$\approx 12 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

Die Berechnung der zur Einhaltung einer mittleren Fließgeschwindigkeit  $v_m = 0,5 \text{ m/s}$  benötigte Sohlneigung  $I_{So}$  wird unter Annahme von gleichförmig-stationären Abflussbedingungen durch Umformen der GMS-Formel in einem Schritt durchgeführt.

$$v_m = k_{st,ges} \cdot \sqrt{I_{So}} \cdot r_{hy}^{2/3}$$

$$= k_{st,ges} \cdot \sqrt{I_{So}} \cdot \left( \frac{A}{I_{U,ges}} \right)^{2/3}$$

$$\Rightarrow I_{So} = \left( \frac{v_m}{k_{st,ges} \cdot \left[ \frac{A}{I_{U,ges}} \right]^{2/3}} \right)^2$$

$$= \left( \frac{0,5}{12,4 \cdot \left[ \frac{0,8}{3,00} \right]^{2/3}} \right)^2$$

$$\approx 0,01 = 1\%$$

Die Länge des Talweges ergibt sich bei einer Wasserspiegeldifferenz an der Wehranlage von  $\Delta h = 2,0 \text{ m}$  zu:

$$L = 2,00/0,01 = 200 \text{ m}$$

Die Strömung im Verbindungsgewässer wird im Rahmen einer detaillierten Planung durch den Einbau von Störsteinen, Riegeln und lokalen Querschnittsaufweitungen aufgelockert. Ebenso sollte eine geschwungene Linienführung vorgesehen werden.

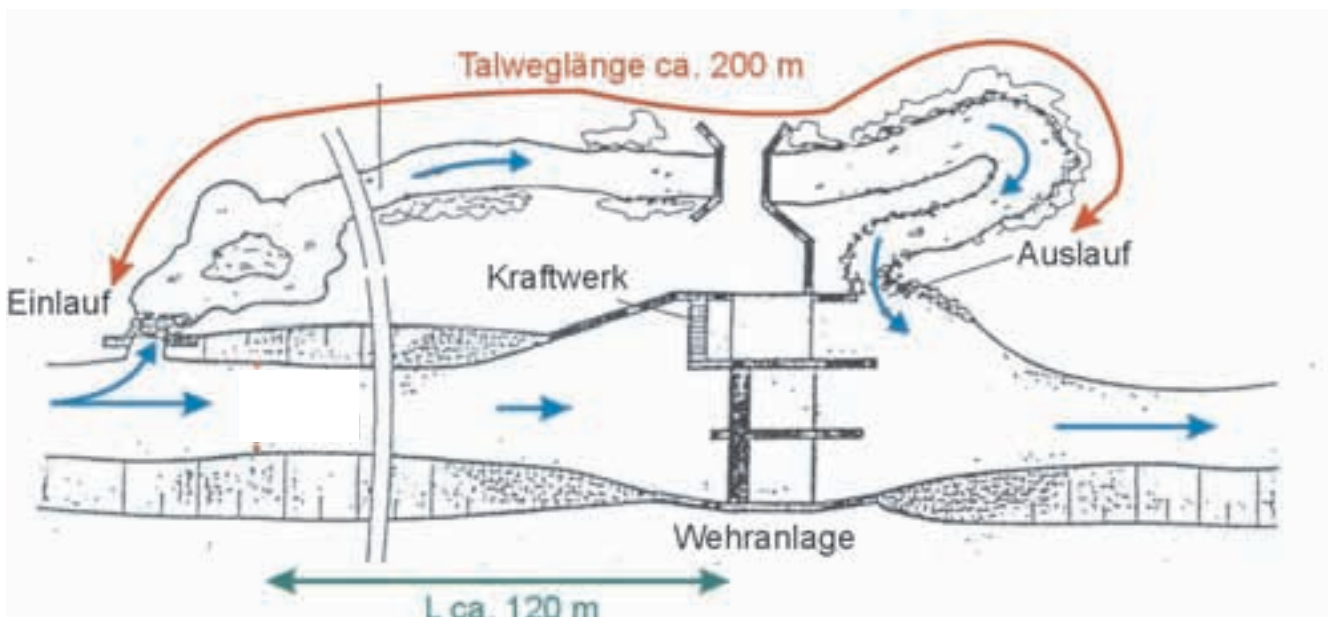


Abb. 76: Darstellung des Verlaufes eines Verbindungsgewässers

## 6.2 Ermittlung der Abflusskurve bei einem unregelmäßigem Doppeltrapezprofil

Für das in Abb. 77 schematisch dargestellte unregelmäßige Doppeltrapezprofil sollen durch vereinfachte hydraulische Berechnungen Stützstellen zur Konstruktion einer Abflusskurve hergeleitet werden.

Der zu untersuchende Abflussbereich liegt dabei zwischen  $NW = 5 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $HW_{10} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 1. Schritt: h zwischen 0 m und 1 m

Für Abflüsse, bei denen sich im Profil Wasserstände zwischen 0 und 1 m einstellen, kann der durchflossene Querschnitt als kompaktes Gerinne angenommen werden. Die Vorländer werden dabei noch nicht überflutet.

Der äquivalente Rauheits-Beiwert setzt sich zusammen aus den Teilrauheiten der Uferböschungen ( $k_{st,Bö} = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  für Steinwurf) und der Sohlrauheit ( $k_{st,So} = 25$ ). Die STRICKLER-Werte wurden entsprechend den Angaben in Kap. 3 gewählt.

Im Folgenden werden nun für 4 Wassertiefen ( $h = 0 \text{ m}$ ,  $h = 0,5 \text{ m}$ ,  $h = 0,75 \text{ m}$  und  $h = 1,0 \text{ m}$ ) die Abflüsse mit der GMS-Formel entsprechend der Berechnung in einem Schritt berechnet. Die Ergebnisse dienen als erste Stützstellen für die Abflusskurve.

#### $h = 0 \text{ m}$

$v_m = 0 \text{ m/s}$  und  $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ , es findet kein Oberflächenabfluss im Gerinne statt.

#### $h = 0,5 \text{ m}$

$$A = 5 \cdot 0,5 + 2 \cdot 0,5^2 = 3 \text{ m}^2$$

$$l_{u,ges} = 5 + 2 \cdot 0,5 \cdot (1+2^2)^{1/2} = 7,24 \text{ m}$$

$$l_{u,Bö} = l_{u,ges} - b_{So} = 7,24 - 5 = 2,24 \text{ m}$$

$$r_{hy} = A/l_{u,ges} = 0,41 \text{ m}$$

$$k_{st,ges} = [7,24 / (2,24/15^{1,5} + 5/25^{1,5})]^{2/3} = 20,40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_m = 20,4 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 0,41^{2/3} = 1,51 \text{ m/s (Fr=0,68 – strömend)}$$

$$Q = 1,51 \cdot 3 = 4,53 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### $h = 0,75 \text{ m}$

$$A = 4,88 \text{ m}^2$$

$$l_{u,ges} = 8,35 \text{ m}$$

$$l_{u,Bö} = 3,35 \text{ m}$$

$$r_{hy} = 0,58 \text{ m}$$

$$k_{st,ges} = [8,35 / (3,35/15^{1,5} + 5/25^{1,5})]^{2/3} = 19,40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_m = 19,4 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 0,58^{2/3} = 1,81 \text{ m/s (Fr=0,67 – strömend)}$$

$$Q = 1,81 \cdot 4,88 = 8,83 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### $h = 1 \text{ m}$ (Hauptgerinne ist bordvoll)

$$A = 7 \text{ m}^2$$

$$l_{u,ges} = 9,47 \text{ m}$$

$$l_{u,Bö} = 4,47 \text{ m}$$

$$r_{hy} = 0,74 \text{ m}$$

$$k_{st,ges} = [9,47 / (4,47/15^{1,5} + 5/25^{1,5})]^{2/3} = 18,71 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_m = 18,71 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 0,74^{2/3} = 2,05 \text{ m/s (Fr=0,66 – strömend)}$$

$$Q = 2,05 \cdot 7 = 14,35 \text{ m}^3/\text{s}$$

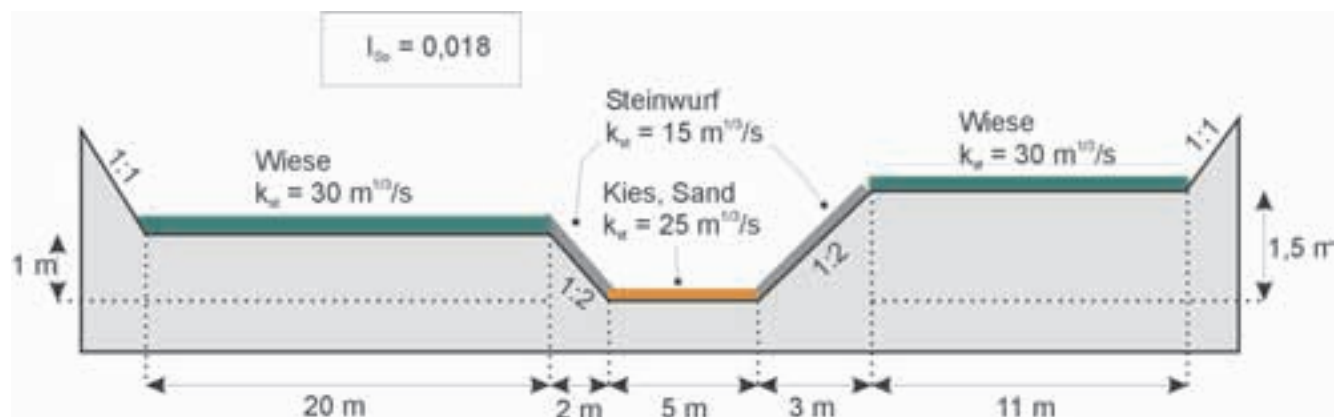


Abb. 77: Skizze des Querschnittes mit vereinfachten Rauheits-Annahmen zur Berechnung der Abflusskurve.



## 2. Schritt: h zwischen 1m und 1,50m

Für Abflüsse, bei denen sich im Profil Wasserstände zwischen 1 m und 1,50 m einstellen, wird neben dem Hauptgerinne (Index F) auch das linke, grasbewachsene Vorland überflutet.

Hier sollen nun jeweils durch eine gegliederte Berechnung weitere Stützstellen für die Abflusskurve berechnet werden. Dazu wird das Verfahren von SELLIN angewandt, wonach zunächst die Teilabflüsse auf dem linken Vorland (Index VI) und dem Hauptgerinne getrennt berechnet werden.

Zusätzlich zur Rauheit der Gerinnewandungen des Hauptgerinnes muss nun noch die Trennflächenrauheit beachtet werden. Aufgrund des Wiesenbewuchses wird die Vorlandrauheit zu  $k_{st,VI} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  gewählt.

### h=1,25 m

linkes Vorland:

$$A_{VI} = 20 \cdot 0,25 + 1/2 \cdot 0,25^2 = 5,03 \text{ m}^2$$

$$l_{u,VI} = 20 + (2 \cdot 0,25^2)^{1/2} = 20,36 \text{ m}$$

$$r_{hy,VI} = 0,25 \text{ m}$$

$$k_{st,VI} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_{m,VI} = 30 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 0,25^{2/3} = 1,60 \text{ m/s}$$

$$Q_{VI} = 1,60 \cdot 5,03 = 8,05 \text{ m}^3/\text{s}$$

Hauptgerinne:

$$A_F = 7 + 0,25 \cdot (5+4) + 0,25 \cdot 0,5^2 = 9,31 \text{ m}^2$$

$$l_{u,F} = 9,47 + (0,25^2 + 0,5^2)^{1/2} = 10,02 \text{ m}$$

$$h_{TI} = 0,25 \text{ m}$$

$$h_{Tr} = 0 \text{ m}$$

$$U_* = 0,25 \text{ m}$$

$$r_{hy,F} = 9,31 / (10,02 + 0,25) = 0,91 \text{ m}$$

$$k_{st,F} = [(10,02 + 0,25) / (5/25^{1,5} + 4,78/15^{1,5})]^{2/3} = 19,18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_{m,F} = 19,18 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 0,91^{2/3} = 2,42 \text{ m/s}$$

$$Q_F = 22,53 \text{ m}^3/\text{s}$$

Gesamt:

$$Q_{ges} = 22,5 + 8,05 = 30,58 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_{m,ges} = Q_{ges} / A_{ges} = 30,58 / (5,03 + 9,31) = 2,31 \text{ m/s}$$

### h=1,50 m

linkes Vorland:

$$A_{VI} = 20 \cdot 0,5 + 1/2 \cdot 0,5^2 = 10,13 \text{ m}^2$$

$$l_{u,VI} = 20 + (2 \cdot 0,5^2)^{1/2} = 20,71 \text{ m}$$

$$r_{hy,VI} = 0,49 \text{ m}$$

$$k_{st,VI} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_{m,VI} = 30 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 0,49^{2/3} = 2,50 \text{ m/s}$$

$$Q_{VI} = 2,50 \cdot 10,13 = 25,34 \text{ m}^3/\text{s}$$

Hauptgerinne:

$$A_F = 7 + 9 \cdot 0,5 + 1/2 \cdot 0,5 \cdot 1 = 11,75 \text{ m}^2$$

$$l_{u,F} = 9,47 + 0,5 + (0,5^2 + 1^2)^{1/2} = 11,09 \text{ m}$$

$$h_{TI} = 0,5 \text{ m}$$

$$h_{Tr} = 0 \text{ m}$$

$$U_* = 0,5 \text{ m}$$

$$r_{hy,F} = 11,75 / (11,09 + 0,5) = 1,01 \text{ m}$$

$$k_{st,F} = [(11,09 + 0,5) / (5/25^{1,5} + 6,59/15^{1,5})]^{2/3} = 17,87 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_{m,F} = 17,87 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 1,01^{2/3} = 2,41 \text{ m/s}$$

$$Q_F = 2,41 \cdot 11,75 = 28,36 \text{ m}^3/\text{s}$$

Gesamt:

$$Q_{ges} = 28,36 + 25,34 = 53,70 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_{m,ges} = 53,70 / (11,75 + 10,13) = 2,45 \text{ m/s}$$

## 3. Schritt: h größer 1,5m

Bei Abflüssen, bei denen sich im Profil Wasserstände größer als 1,50 m einstellen, kommt es zu einer Überflutung beider Vorländer. Hier wird nun wieder nach dem Verfahren von SELLIN exemplarisch eine weitere Stützstelle berechnet.

### h=1,75 m

linkes Vorland:

$$A_{VI} = 20 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 0,75^2 = 15,28 \text{ m}^2$$

$$l_{u,VI} = 20 + (2 \cdot 0,75^2)^{1/2} = 21,06 \text{ m}$$

$$r_{hy,VI} = 0,73 \text{ m}$$

$$k_{st,VI} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_{m,VI} = 30 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 0,73^{2/3} = 3,26 \text{ m/s}$$

$$Q_{VI} = 3,26 \cdot 15,28 = 49,86 \text{ m}^3/\text{s}$$

rechtes Vorland:

$$A_{Vr} = 0,25 \cdot 11 + 0,5 \cdot 0,25^2 = 2,78 \text{ m}^2$$

$$l_{u,Vr} = 11 + (2 \cdot 0,25^2)^{1/2} = 11,35 \text{ m}$$

$$r_{hy,Vr} = 0,24 \text{ m}$$

$$k_{st,Vr} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_{m,Vr} = 30 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 0,24^{2/3} = 1,55 \text{ m/s}$$

$$Q_{Vr} = 1,55 \cdot 2,78 = 4,31 \text{ m}^3/\text{s}$$

Hauptgerinne:

$$A_F = 7 + 9 \cdot 0,75 + 1 \cdot 0,25 + 0,5^2 \cdot 1 = 14,25 \text{ m}^2$$

$$I_{u,F} = 9,47 + (0,5^2 + 1,0^2)^{1/2} = 10,59 \text{ m}$$

$$h_{TI} = 0,75 \text{ m}$$

$$h_{Tr} = 0,25 \text{ m}$$

$$U^* = 0,75 + 0,25 = 1,0 \text{ m}$$

$$r_{hy,F} = 14,25 / (10,59 + 1,0) = 1,23 \text{ m}$$

$$k_{St,F} = [(11,59) / (5/25^{1,5} + (6,59-5)/15^{1,5})]^{2/3} = 17,86 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$v_{m,F} = 17,86 \cdot 0,018^{1/2} \cdot 1,23^{2/3} = 2,75 \text{ m/s}$$

$$Q_F = 2,75 \cdot 14,25 = 39,19 \text{ m}^3/\text{s}$$

Gesamt:

$$Q_{ges} = 39,19 + 4,31 + 49,86 = 93,36 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_{m,ges} = 93,36 / (15,28 + 2,78 + 14,25) = 2,89 \text{ m/s}$$

#### 4. Schritt: Ableitung der Abflusskurve

Zunächst werden noch einmal alle berechneten Stützstellen zusammengetragen:

Wassertiefe h [m]	mittlere Fließgeschwindigkeit $v_m$ [m/s]	Berechneter Abfluss Q [m <sup>3</sup> /s]	mittlere Froude-Zahl Fr [-]
0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	1,51	4,53	0,68
0,75	1,81	8,83	0,67
1,00	2,05	14,35	0,66
1,25	2,13	30,58	0,61
1,50	2,45	53,70	0,64
1,75	2,89	93,36	0,70

Die Stützstellen werden in ein Diagramm aufgetragen und durch Regression kann daraus die Abflusskurve abgeleitet werden.

Die Regression ergibt folgenden funktionalen Zusammenhang zwischen Wasserstand und Abfluss im Bereich zwischen NQ und HQ<sub>10</sub>:  $Q(h) = 0,304 \cdot h^{0,4019}$ . Das Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,97$  bestätigt eine im Rahmen der vereinfachenden Annahmen ausreichende Übereinstimmung zwischen Stützstellen und Regressionskurve.

Abflusskurve (Wasserstands-Abfluss-Beziehung)

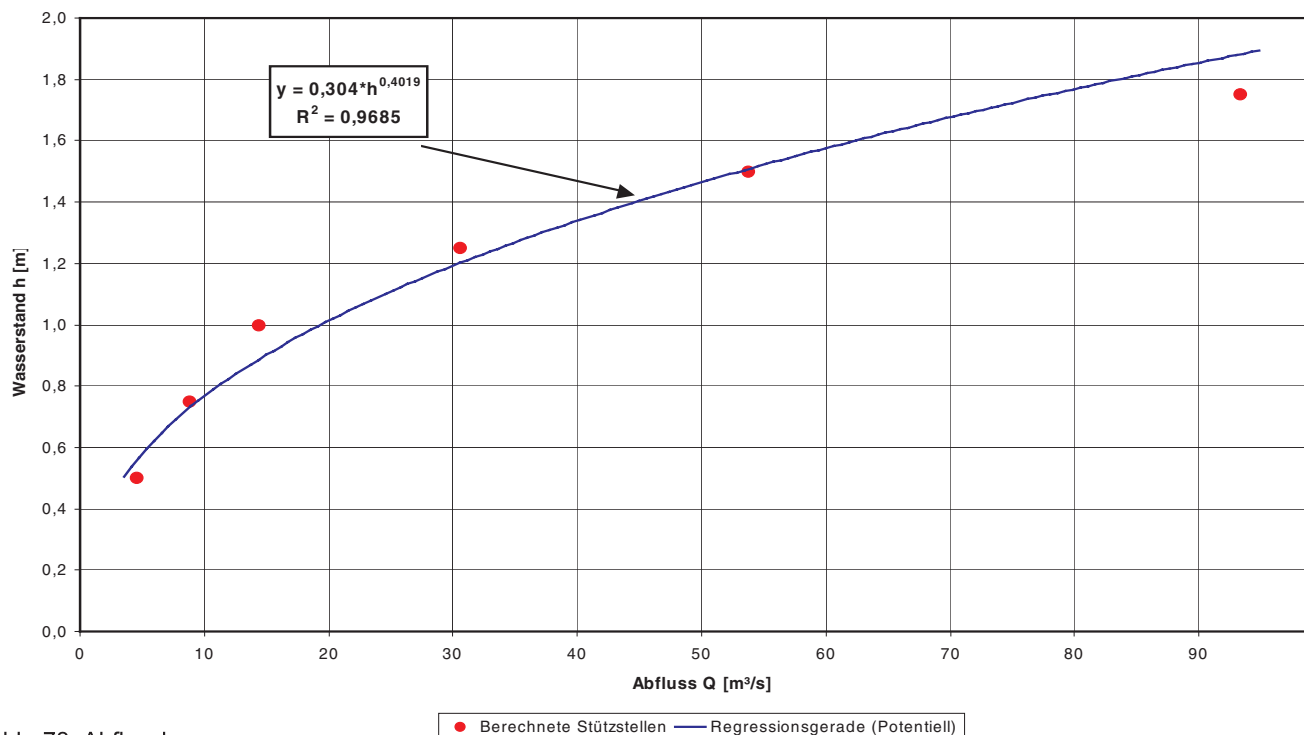


Abb. 78: Abflusskurve.

### 6.3 Anwendung der Formblätter im Feldeinsatz zur Abschätzung der Abflussleistung eines Baches

In diesem Beispiel soll für ein kompaktes Gerinne die Querschnittsgeometrie bestimmt und vereinfacht der Abfluss zum Zeitpunkt der Begehung sowie der bordvolle Abfluss (Abflussleistung) berechnet werden. Dazu werden die in Kap. 4.5 aufgezeigten Formblätter verwendet.

Zunächst wird der für die Berechnung relevante Gewässerabschnitt besichtigt. Dabei wird besonders auf Unregelmäßigkeiten im Gewässerbett selbst sowie auf die Verteilung und Anordnung des Böschungsbewuchses geachtet. Aufgrund der gemachten Beobachtungen wird nun ein für den Abschnitt charakteristischer Querschnitt festgelegt.

Da für den zu untersuchenden Gewässerabschnitt keinerlei Vermessungsdaten vorliegen, soll mit Hilfe der Formblätter die Querschnittsgeometrie vereinfacht vermessen werden. Mit Hilfe von einem Maßband und einem Meterstab werden die in der Skizze auf dem Formblatt aufgezeigten querschnittscharakterisierenden Abstände vereinfacht gemessen und auf dem Formblatt notiert.

Die Sohle wird vereinfacht als über den Querschnitt horizontal angenommen. Die Wassertiefe wird an mehreren Stellen im Querschnitt gemessen und gemittelt.

Anhand der ausgefüllten Formblätter (**siehe folgende Seiten**) ergibt sich für den Gewässerabschnitt folgender Rauheitsbeiwert  $k_{st,ges}$ :

- Das Verfahren von COWAN liefert einen Wert von  $k_{st,ges} = 22,7 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Dieser Wert kann als eine erste Näherung betrachtet werden.
- Anhand der gewählten Teilrauheitsbeiwerte auf dem Formblatt erhält man nach dem Verfahren von EINSTEIN/HORTON folgenden Rauheitsbeiwert:  
 $A = 9,50 \cdot 0,40 + 0,5 \cdot 0,4 \cdot (0,24 + 0,28) = 3,90 \text{ m}^2$   
 $l_{U,So} = 9,50 \text{ m}, \quad k_{st,So} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$   
 $l_{U,Bö,li} = 0,47 \text{ m}, \quad k_{st,Bö,li} = 18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

$$l_{U,Bö,re} = 0,49 \text{ m}, \quad k_{st,Bö,re} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$l_{U,ges} = 9,5 + 0,47 + 0,49 = 10,46 \text{ m}$$

$$k_{st,ges} = (10,46 / [0,092 + 0,008 + 0,005])^{2/3} = 21,4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

Berechnet man daraus nun durch Anwendung der GMS-Formel (Sohlgefälle  $l_{So} = 0,003$ , abgegriffen aus einer gewässerkundlichen Karte) den zum Zeitpunkt der Querschnittsschätzung vorhandenen Abfluss (bei  $h_m = 0,4 \text{ m}$ ), erhält man folgende Ergebnisse:

Berechnung des Abflusses für $h = 0,40 \text{ m}$ unter Berücksichtigung der ermittelten Rauheitsbeiwerte bzw. durch Schätzung von $v_m$		
COWAN	EINSTEIN/H.	Schätzung von $v_m$
$Q = 2,51 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 2,36 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = v_m \cdot A = 1,95 \text{ m}^3/\text{s}$

Hieraus wird ersichtlich, dass sich eine Ergebnisspanne von  $Q = 1,95 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $Q = 2,51 \text{ m}^3/\text{s}$  ergibt.

Der tatsächliche Abfluss zum Zeitpunkt der Messung konnte im Rahmen des Beispiels anhand einer nahegelegenen Messstelle zu  $Q = 2,30 \text{ m}^3/\text{s}$  ermittelt werden. Dadurch ergeben sich folgende Abweichungen:

$$\begin{aligned} \text{COWAN } (k_{st,ges} = 22,7 \text{ m}^{1/3}/\text{s}): & \quad + 8\% \\ \text{EINSTEIN/HORTON } (k_{st,ges} = 21,4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}): & \quad + 3\% \\ \text{Schätzung von } v_m \text{ (} Q = v_m \cdot A \text{):} & \quad -17\% \end{aligned}$$

Für die Berechnung der Abflussleistung bei bordvollem Querschnitt wird folgender  $k_{st,ges}$ -Wert angenommen:  $k_{st,ges} = 21,4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Damit ergibt sich vereinfachend und ohne Berücksichtigung des Bewuchses an der Böschung folgende Abflussleistung:

$$\begin{aligned} h_{max} &= 4,60 \text{ m (bordvoll)} \\ A &= 57,5 \text{ m}^2 \\ l_{U,ges} &= 20,49 \text{ m} \\ r_{hy} &= 2,81 \text{ m} \\ v_{m,ber} &= 21,4 \cdot (0,003)^{0,5} \cdot 2,81^{2/3} = 2,33 \text{ m/s} \\ Fr &= 2,33 / (9,81 \cdot 4,6)^{0,5} = 0,34 \text{ (strömend)} \\ Q &= v_{m,ber} \cdot A \approx 130 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Die erneute Berechnung des  $k_{st,ges}$ -Wertes nach EINSTEIN/HORTON bei  $h_{max}$  führt zu einem ähnlichem Ergebnis:

$$\begin{aligned} k_{st,ges} &= (20,49 / [0,071 + 0,092 + 0,063])^{2/3} \\ &= 20,18 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \\ Q &= 20,18 \cdot (0,003)^{0,5} \cdot 2,81^{2/3} \cdot 57,5 \\ &\approx 127 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

### Skizze des Querschnittes mit eingetragenen Abmessungen

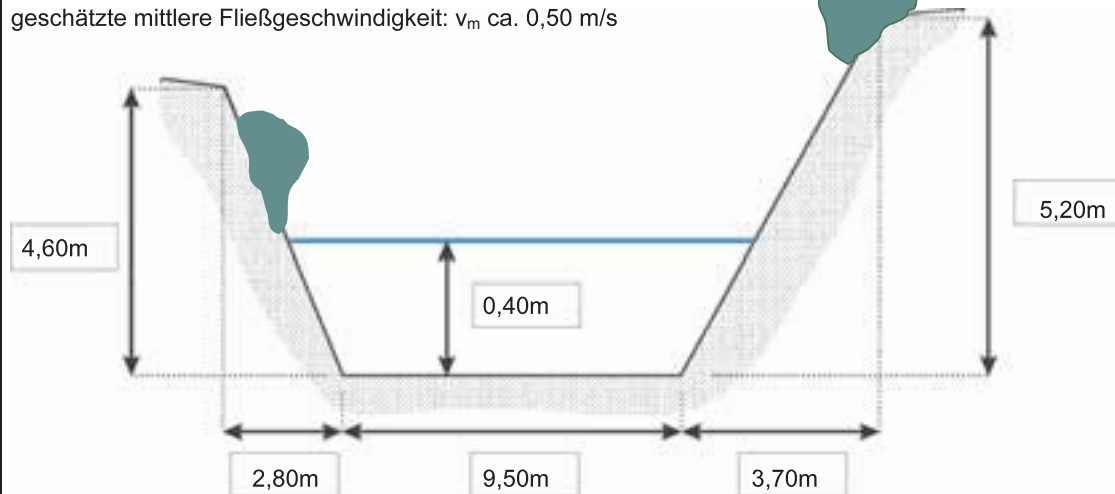
Gewässer:	Alb	Datum / Uhrzeit:	25.07.2000 / 10:15
Ort / Stationierung:	Ortslage Karlsruhe beim „Kühlen Krug“	Bearbeiter:	Lehmann

### Nicht maßstäbliche Querschnittsskizze für kompakte/gegliederte Gerinne

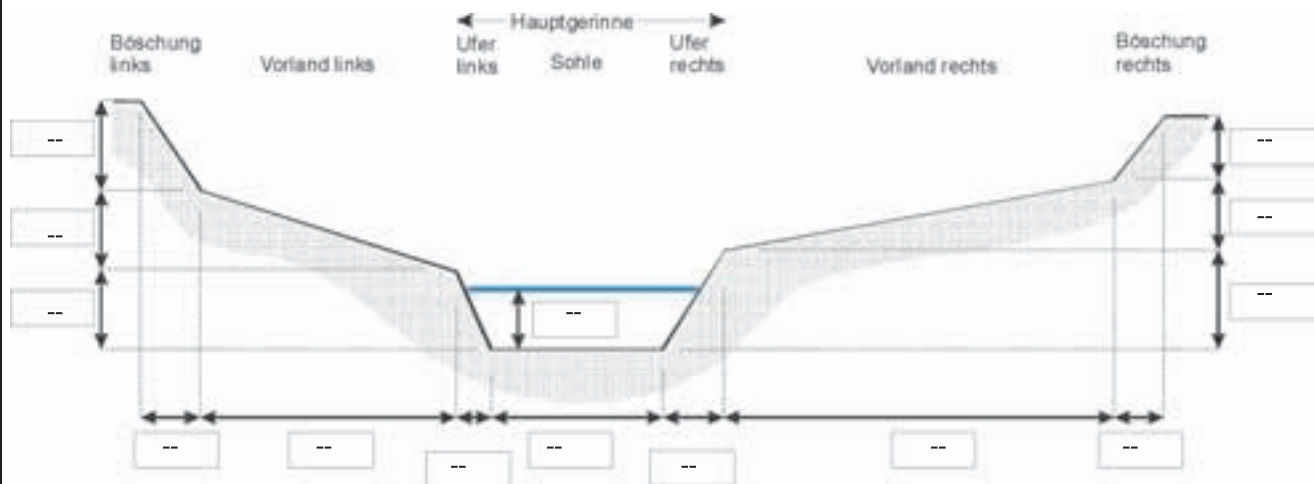
Die relevanten Abmessungen sind in die Kästchen einzutragen. Bewuchselemente sollten skizziert werden.

Für kompakte Gerinne (Blick in Fließrichtung):

geschätzte mittlere Fließgeschwindigkeit:  $v_m$  ca. 0,50 m/s



Für gegliederte Gerinne (Blick in Fließrichtung):



### Weitere Angaben:

Wassertiefe  $h$ : Die Gerinnesohle ist idealisiert als horizontal anzunehmen. Die Wassertiefe ist an mehreren Stellen im Querschnitt zu messen und dann zu mitteln. Der gemittelte Wert wird dann in die Skizze eingetragen.


Fließgeschwindigkeit  $v_m$ : Die mittlere Fließgeschwindigkeit sollte auch geschätzt werden. Durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung  $Q = v_m \cdot A$  kann damit ein erster Näherungswert für den Abfluss berechnet werden.

Bewuchselemente: Bewuchs (Bäume, Sträucher, Büsche, Kraut, Gras) sollte mit in die Skizze eingetragen werden.



Wahl der Teilrauheitsbeiwerte $k_{st,i}$ zur Berechnung der äquivalenten Gerinnerrauheit $k_{st,ges}$ nach EINSTEIN/HORTON (→Kap. 5.2.2)			
<b>1) Wahl der Sohlenrauheit <math>k_{st,So}</math> [<math>m^{1/3}/s</math>]</b>			
Beschreibung .....	$k_{st}$ -Wert	Wahl	
• Sohle ohne Unregelmäßigkeiten ...			
...glatt (z.B. Feinkies $k_{st}$ ca. $40 m^{1/3}/s$ ).....	38 bis 42	<input type="checkbox"/>	
...mit mäßigem Geschiebetrieb (stabile Deckschicht; z.B. Grobkies ca. $35 m^{1/3}/s$ ).....	33 bis 38	<input type="checkbox"/>	
...reich an Geschiebe oder großen Steinen .....	25 bis 33	<input type="checkbox"/>	
• Sohle mit Unregelmäßigkeiten (z.B. Becken, Sandbänke, unregelmäßige Sieblinie) ...			
...ohne signifikanten aquatischen Bewuchs .....	24 bis 30	<input type="checkbox"/>	
...mit vereinzelt großen Steinen und Verkrautung.....	20 bis 28	<input checked="" type="checkbox"/>	
...mit vermehrt großen Steinen .....	17 bis 22	<input type="checkbox"/>	
...ausgeprägte Absturz-Becken-Struktur bzw. Stromschnellen und Verkrautung .....	13 bis 20	<input type="checkbox"/>	
<b>Gewählte Sohlenrauheit: <math>k_{st,So} = 22 m^{1/3}/s</math></b>			
<b>2) Wahl der Uferböschungsräuheiten <math>k_{st,Bö,li}</math> und <math>k_{st,Bö,re}</math> [<math>m^{1/3}/s</math>]</b>			
Beschreibung .....	$k_{st}$ -Wert	Wahl	
		li.	re.
• kein Bewuchs, homogen.....	30 bis 40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Baumbewuchs – nur Stämme umströmt (evtl. hier Flächenabzugsverfahren!).....	17 bis 29	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Buschbewuchs – Astwerk durchströmt (evtl. Flächenabzugsverfahren!).....	7 bis 13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Verkrautung .....	8 bis 20	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Grasbewuchs .....	15 bis 25	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Gewählte Uferböschungsräuheit: <math>k_{st,Bö,li} = 18 m^{1/3}/s</math> und <math>k_{st,Bö,re} = 20 m^{1/3}/s</math></b>			
<b>3) Wahl der Vorlandrauheiten <math>k_{st,V,li}</math> und <math>k_{st,V,re}</math> [<math>m^{1/3}/s</math>]</b>			
Beschreibung .....	$k_{st}$ -Wert	Wahl	
		li.	re.
• Grasflächen ohne Büsche ...			
...kurzes Gras .....	28 bis 40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...hohes Gras .....	20 bis 33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• landwirtschaftlich genutzte Flächen ...			
...ohne Bepflanzung bzw. überströmter Bewuchs, der sich anschmiegt.....	25 bis 40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...mit Bepflanzung bzw. umströmter Bewuchs mit signifikantem Widerstand .....	20 bis 35	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Buschbewuchs...			
...vereinzelt .....	14 bis 35	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...unregelmäßig verteilt, im Frühjahr und Sommer mit Blätter.....	13 bis 25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...unregelmäßig verteilt, im Herbst und Winter ohne Blätter .....	17 bis 28	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...starker Vorlandbewuchs im Frühjahr und Sommer.....	6 bis 14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...starker Vorlandbewuchs im Herbst und Winter.....	9 bis 22	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Baumbewuchs ...			
...nur Stämme werden umströmt (evtl. Flächenabzugsverfahren!) .....	20 bis 33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...umströmtes dichtes Astwerk, bewachsen .....	13 bis 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...umströmter Jung- bzw. Kleinbewuchs, der sich nicht anschmiegt.....	6 bis 13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Gewählte Vorlandrauheiten: <math>k_{st,V,li} = \underline{\hspace{2cm}} m^{1/3}/s</math> und <math>k_{st,V,re} = \underline{\hspace{2cm}} m^{1/3}/s</math></b>			

Alle angegebenen Zahlenwerte wurden der Literatur entnommen, vgl. dazu [1], [2], [3], [4], [6], [9] und [8].

Vereinfachte Abschätzung des $k_{st,ges}$ -Wertes nach COWAN (→Kap. 5.2.1)				
Beschaffenheit des Sohlenmaterials ( $n_0$ )		Änderungen in der Gerinnequerschnittsform ( $n_2$ )		Einfluss von Bewuchs ( $n_4$ )
Erde..... 0,020 <input type="checkbox"/>		schwach .....0,000 <input checked="" type="checkbox"/>		nieder ..... 0,005 bis 0,010 <input checked="" type="checkbox"/>
gebrochener Fels ..... 0,025 <input type="checkbox"/>		selten auftretend ....0,005 <input type="checkbox"/>		mittel ..... 0,010 bis 0,025 <input type="checkbox"/>
Feinkies ..... 0,024 <input checked="" type="checkbox"/>		häufig auftretend ....0,010 bis 0,015 <input type="checkbox"/>		hoch ..... 0,025 bis 0,050 <input type="checkbox"/>
Grobkies ..... 0,028 <input type="checkbox"/>				sehr hoch ..... 0,050 bis 0,100 <input type="checkbox"/>
Unregelmäßigkeit des Sohlenmaterials ( $n_1$ )		Einfluss von Hindernissen ( $n_3$ )		Mäandrierungsgrad ( $m_5$ )
vernachlässigbar ..... 0,000 <input type="checkbox"/>		vernachlässigbar ....0,000 <input type="checkbox"/>		gering ..... 1,000 <input checked="" type="checkbox"/>
gering ..... 0,005 <input checked="" type="checkbox"/>		gering .....0,010 bis 0,015 <input type="checkbox"/>		merklich ..... 1,150 <input type="checkbox"/>
mittel ..... 0,010 <input type="checkbox"/>		merklich .....0,020 bis 0,030 <input checked="" type="checkbox"/>		stark ..... 1,300 <input type="checkbox"/>
stark ..... 0,020 <input type="checkbox"/>		stark .....0,040 bis 0,060 <input type="checkbox"/>		
<b>Berechnung des <math>k_{st,ges}</math>-Wertes nach COWAN: <math>k_{st,ges} = 1 / [(n_0+n_1+n_2+n_3+n_4) \cdot m_5] = \underline{22,7} \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>				
<b>Beschreibung der Bewuchseigenschaften (Angabe der Abmessungen etc.)</b>				
	Vorland links	Uferböschung links	Uferböschung rechts	Vorland rechts
Junge Bäume, Verästelung umströmt	---			---
Alte Bäume, nur Stamm umströmt	---	nur oberhalb der Mittelwasserlinie	nur am oberen Böschungsrand	---
Junge Weiden und Röhrichte, die sich umlegen	---	nur oberhalb der Mittelwasserlinie	eher selten	---
Alte Weiden und Sträucher mit stabilen Widerstand	---			---
Sonstige	---			---
<b>Foto des Gewässerabschnittes</b>				
				
Film Nr.: 1    Foto Nr.: 1    Standort: Brücke „Kühler Krug“				
Aufnahme/Blickrichtung: <input type="checkbox"/> nach OW <input checked="" type="checkbox"/> nach UW <input type="checkbox"/> vom rechten Ufer aus <input type="checkbox"/> vom linken Ufer aus <input checked="" type="checkbox"/> von Brücke				
Bemerkungen: _____				

## 6.4 Vereinfachte Ermittlung von Überflutungsflächen für ein Bemessungshochwasser

Oftmals ist es wichtig, bei der Umgestaltung eines Gerinnequerschnittes innerhalb bzw. im Bereich von Ortslagen zu wissen, was sich im Hochwasserfall in diesem Abschnitt für Wasserspiegellagen einstellen werden. Hierzu greift man in der Praxis auf ein-, zwei- oder dreidimensionale numerische Modelle zurück (vgl. Bsp. 6.6). Bei komplizierten hydraulischen Situationen können auch physikalische Modelle zum Einsatz kommen.

In diesem Beispiel soll gezeigt werden, wie man im Rahmen einer vereinfachten hydraulischen Berechnung durch Abschätzung der Rauheiten und Anwendung der GMS-Formel die Überflutungsfläche grob abschätzen kann.

Ein Gewässerabschnitt mit kompakten Trapezquerschnitt soll durch Tieferlegung des rechten Vorlandes in ein gegliedertes Gerinne umgestaltet werden. Die Maßnahme liegt innerhalb einer Ortschaft und soll als Erholungsgebiet dienen. Entlang des Gewässerlaufes muss ein Rad- und Fußweg verlaufen, der erst ab einem Abflussereignis  $HQ_{10} = 45 \text{ m}^3/\text{s}$  überströmt werden darf. In Abbildung 6.5 ist die Situation skizzenhaft dargestellt.

Aufgrund der Gerinnebeschaffenheit werden folgende Rauheitsbeiwerte angenommen:

Uferböschungen:  $k_{st,Bö} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Sohle:  $k_{st,So} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Tiefergelegtes Vorland:  $k_{st,Vr} = 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Für die Querschnitte ① und ③ erfolgt die Berechnung der Wassertiefe in einem Schritt mit der GMS-Formel. Dazu wird nach EINSTEIN/HORTON der  $k_{st,ges}$ -Wert berechnet. Die Ergebnisse sind tabellarisch auf der folgenden Seite dargestellt.

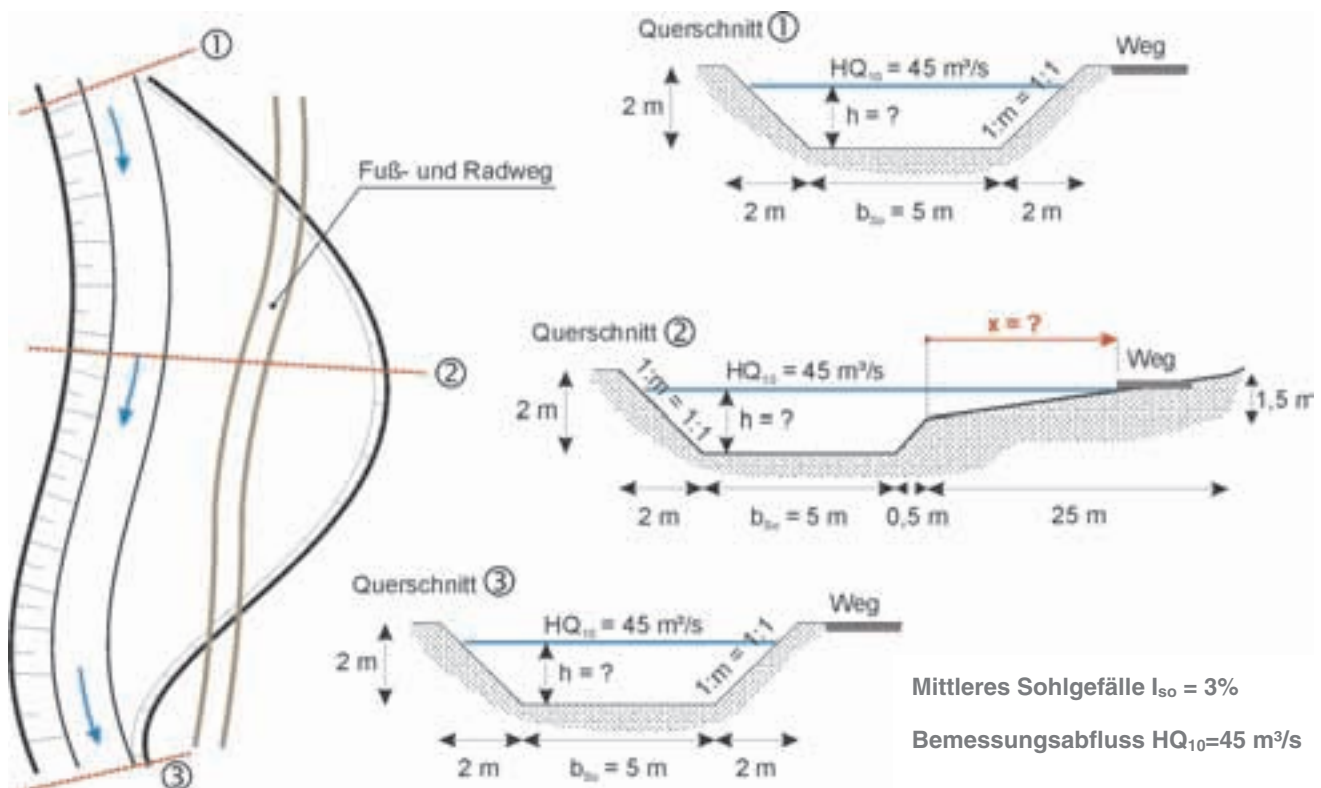


Abb. 79: Grundriss und Querschnitte zur geplanten Maßnahme.

Berechnung der Wassertiefe bei Querschnitt ① und ③							
h [m]	A [m <sup>2</sup> ]	l <sub>U,ges</sub> [m]	l <sub>U,Bö</sub> [m]	r <sub>hy</sub> [m]	k <sub>st,ges</sub> [m <sup>1/3</sup> /s]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]
1,00	6,00	7,83	2,83	0,77	27,0	3,92	23,51
1,10	6,71	8,11	3,11	0,83	26,6	4,07	27,30
1,20	7,44	8,39	3,39	0,89	26,3	4,21	31,32
1,30	8,19	8,68	3,68	0,94	26,1	4,34	35,56
1,40	8,96	8,96	3,96	1,00	25,8	4,47	40,02
<b>1,50</b>	<b>9,75</b>	<b>9,24</b>	<b>4,24</b>	<b>1,06</b>	<b>25,5</b>	<b>4,59</b>	<b>44,71 ≈ 45 = HQ<sub>10</sub></b>
1,60	10,56	9,53	4,53	1,11	25,3	4,69	49,62
1,70	11,39	9,81	4,81	1,16	25,1	4,80	54,75

Bei Querschnitt ② wird ab einer Wassertiefe von 0,5 m das im Rahmen der Maßnahme tiefergelegte rechte Vorland überflutet. Dadurch wird eine gegliederte Berechnung notwendig.

Die Berechnung wurde hier EDV-gestützt durchgeführt, um für HQ<sub>10</sub> die Wassertiefe zu ermitteln. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt.

Berechnung der Wassertiefe bei Querschnitt ②													
h [m]	Hauptgerinne							rechtes Vorland					Q <sub>ges</sub> [m <sup>3</sup> /s]
	A <sub>F</sub> [m <sup>2</sup> ]	h <sub>Tr</sub> [m]	l <sub>U,F</sub> [m]	r <sub>hy,F</sub> [m]	k <sub>st,F</sub> [m <sup>1/3</sup> /s]	v <sub>F</sub> [m/s]	Q <sub>F</sub> [m <sup>3</sup> /s]	A <sub>V,r</sub> [m <sup>2</sup> ]	l <sub>U,vr</sub> [m]	r <sub>hy,vr</sub> [m]	v <sub>Vr</sub> [m/s]	Q <sub>Vr</sub> [m <sup>3</sup> /s]	
0,90	4,83	0,40	6,79	0,71	28,68	3,95	19,10	3,33	6,68	0,49	3,05	10,17	29,28
1,00	5,37	0,50	7,03	0,76	28,22	4,08	21,95	4,16	8,35	0,49	3,05	12,71	34,66
1,10	5,93	0,60	7,28	0,81	27,80	4,20	24,91	5,00	10,02	0,49	3,05	15,26	40,17
<b>1,20</b>	<b>6,49</b>	<b>0,70</b>	<b>7,52</b>	<b>0,86</b>	<b>27,43</b>	<b>4,30</b>	<b>27,98</b>	<b>5,83</b>	<b>11,69</b>	<b>0,49</b>	<b>3,05</b>	<b>17,80</b>	<b>45,79</b>
1,30	7,07	0,80	7,76	0,91	27,09	4,40	31,17	6,66	13,36	0,49	3,05	20,34	51,52
1,40	7,65	0,90	8,00	0,95	26,78	4,50	34,47	7,50	15,03	0,49	3,05	22,89	57,36

Hieraus wird ersichtlich, dass sich bei einem HQ<sub>10</sub> in den Querschnitten ① und ③ eine Wassertiefe von ca. 1,50 m und im Querschnitt ② von 1,20 m einstellt. Daraus lässt sich die Überflutungsfläche grob skizzieren.

Der Weg muss im tiefergelegten Abschnitt ca.  $(25/1,5) \cdot (1,2-0,5) \approx 12$  m vom rechten Uferböschungsrand entfernt liegen, um bei einem HQ<sub>10</sub> nicht überflutet zu werden.

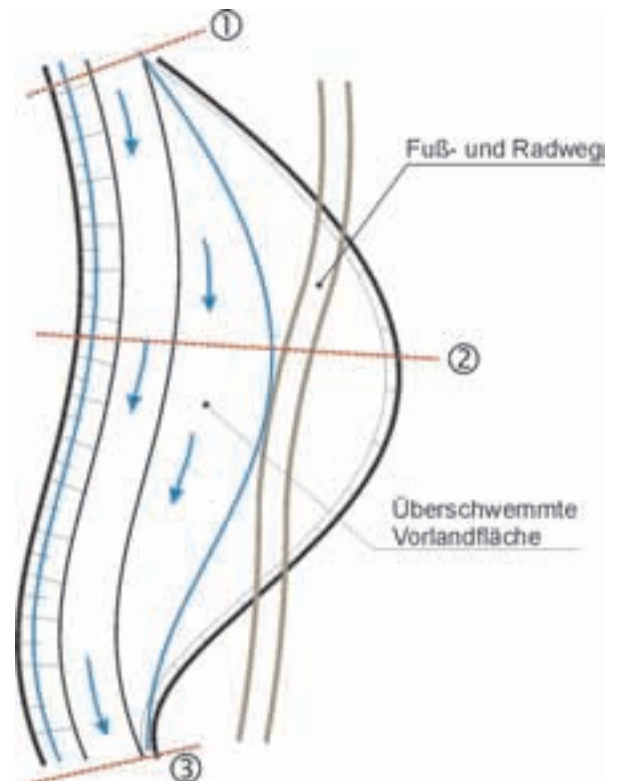


Abb. 80: Skizze des Überschwemmungsgebietes.



## 6.5 Rekonstruktion eines Abflussereignisses anhand von Geschwemmsellinien

Ein kleiner Wildbach ufert infolge eines extremen Hochwassers aus und verursacht in einer unterhalb gelegenen Ortschaft große Schäden. Im gesamten Einzugsgebietes des Gewässers befindet sich keine Messstelle, so dass der Spitzenabfluss nicht bekannt ist.

Durch eine vereinfachte hydraulische Berechnung soll nun der Spitzenabfluss abgeschätzt werden. Dazu stehen Luftbilder einer großflächig überströmten Wiese, auf der sich sehr gut eine Geschwemmsellinie erkennen lässt, zur Verfügung.

Mit Hilfe der Formblätter wird ein charakteristischer Querschnitt in diesem Bereich aufgenommen und anhand der Lage der Geschwemmsellinie der maximale Wasserstand rekonstruiert und eingetragen.

Auf den folgenden Seiten sind die ausgefüllten Formblätter dargestellt.

### Bemerkung:

In Abb. 81 ist durch die eingetragenen Fließrichtungspfeile deutlich zu erkennen, dass infolge der Umströmung höhergelegener Wiesenteile („Inseln“) der gesamte Gewässerabschnitt von Quer- und Sekundärströmungseinflüssen geprägt war. Eine einfache Berechnung, wie sie hier gemacht wird, berücksichtigt solche Einflüsse nicht. Die Rechnung darf deshalb nur als erste grobe Abschätzung des Abflusses betrachtet werden.



Abb. 81: Luftbild der vormals überfluteten Wiese. Eingetragen sind die Geschwemmsellinien sowie umflossene „Inseln“ auf der Wiese selbst. Ebenso wurde die Lage des aufgenommenen Querschnittes eingetragen.

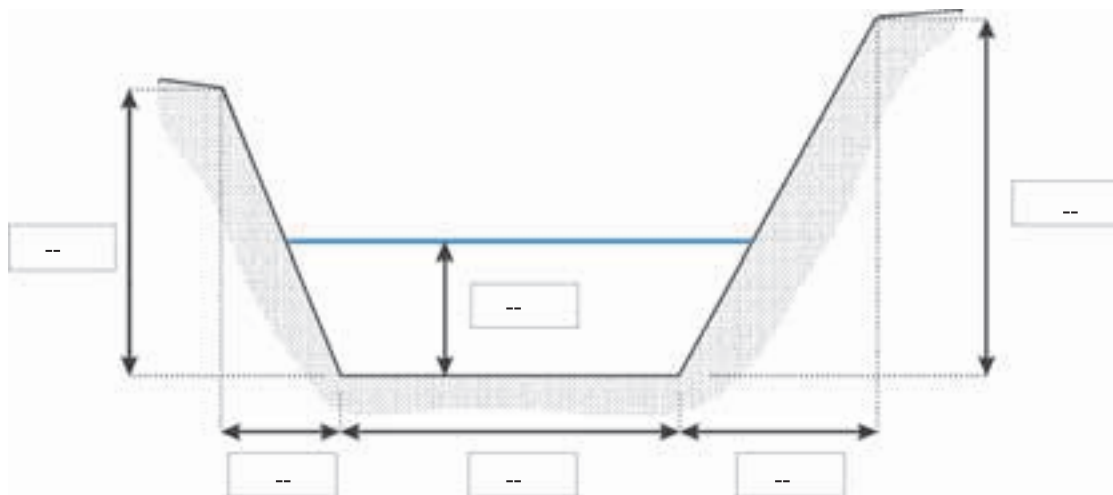
### Skizze des Querschnittes mit eingetragenen Abmessungen

Gewässer:	Döllbach	Datum / Uhrzeit:	20.07.2000 / 15:25
Ort / Stationierung:	Wiese bei Ortslage Lehmdorf	Bearbeiter:	Lehmann, Boris

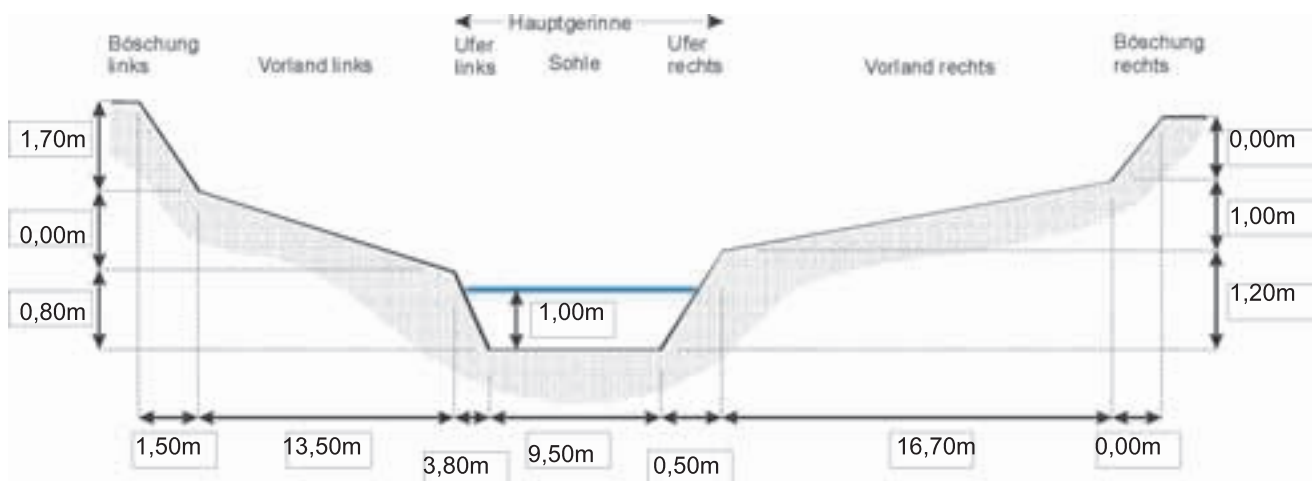
#### Nicht maßstäbliche Querschnittsskizze für kompakte/gedielte Gerinne

Die relevanten Abmessungen sind in die Kästchen einzutragen. Bewuchselemente sollten skizziert werden.

Für kompakte Gerinne (Blick in Fließrichtung):



Für gegliederte Gerinne (Blick in Fließrichtung):



#### Weitere Angaben:


Wassertiefe  $h$ : Die Gerinnesohle ist idealisiert als horizontal anzunehmen. Die Wassertiefe ist an mehreren Stellen im Querschnitt zu messen und dann zu mitteln. Der gemittelte Wert wird dann in die Skizze eingetragen.

Fließgeschwindigkeit  $v_m$ : Die mittlere Fließgeschwindigkeit sollte auch geschätzt werden. Durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung  $Q = v_m \cdot A$  kann damit ein erster Näherungswert für den Abfluss berechnet werden.

Bewuchselemente: Bewuchs (Bäume, Sträucher, Büsche, Kraut, Gras) sollte mit in die Skizze eingetragen werden.

<b>Wahl der Teilrauheitsbeiwerte <math>k_{st,i}</math> zur Berechnung der äquivalenten Gerinnerrauheit <math>k_{st,ges}</math> nach EINSTEIN/HORTON (→Kap. 5.2.2)</b>			
<b>2) Wahl der Sohlenrauheit <math>k_{st,So}</math> [<math>m^{1/3}/s</math>]</b>			
Beschreibung .....	$k_{st}$ -Wert	Wahl	
• Sohle ohne Unregelmäßigkeiten			
...glatt (z.B. Feinkies $k_{st}$ ca. $40 m^{1/3}/s$ ).....	38 bis 42	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...mit mäßigem Geschiebetrieb (stabile Deckschicht; z.B. Grobkies ca. $35 m^{1/3}/s$ ).....	33 bis 38	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...reich an Geschiebe oder großen Steinen .....	25 bis 33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Sohle mit Unregelmäßigkeiten (z.B. Becken, Sandbänke, unregelmäßige Sieblinie) ...			
...ohne signifikanten aquatischen Bewuchs .....	24 bis 30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...mit vereinzelt großen Steinen und Verkrautung.....	20 bis 28	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...mit vermehrt großen Steinen .....	17 bis 22	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...ausgeprägte Absturz-Becken-Struktur bzw. Stromschnellen und Verkrautung .....	13 bis 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Gewählte Sohlenrauheit: <math>k_{st,So} = 17 m^{1/3}/s</math></b>			
<b>2) Wahl der Uferböschungsrauhigkeiten <math>k_{st,Bö,li}</math> und <math>k_{st,Bö,re}</math> [<math>m^{1/3}/s</math>]</b>			
Beschreibung .....	$k_{st}$ -Wert	Wahl	
		li.	re.
• kein Bewuchs, homogen.....	30 bis 40	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
• Baumbewuchs – nur Stämme umströmt (evtl. hier Flächenabzugsverfahren!).....	17 bis 29	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Buschbewuchs – Astwerk durchströmt (evtl. Flächenabzugsverfahren!).....	7 bis 13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Verkrautung .....	8 bis 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Grasbewuchs.....	15 bis 25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Gewählte Uferböschungsrauhigkeit: <math>k_{st,Bö,li} = 30 m^{1/3}/s</math> und <math>k_{st,Bö,re} = 30 m^{1/3}/s</math></b>			
<b>3) Wahl der Vorlandrauheiten <math>k_{st,V,li}</math> und <math>k_{st,V,re}</math> [<math>m^{1/3}/s</math>]</b>			
Beschreibung .....	$k_{st}$ -Wert	Wahl	
		li.	re.
• Grasflächen ohne Büsche ...			
...kurzes Gras .....	28 bis 40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...hohes Gras .....	20 bis 33	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
• landwirtschaftlich genutzte Flächen ...			
...ohne Bepflanzung bzw. überströmter Bewuchs, der sich anschmiegt.....	25 bis 40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...mit Bepflanzung bzw. umströmter Bewuchs mit signifikantem Widerstand .....	20 bis 35	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Buschbewuchs...			
...vereinzelt .....	14 bis 35	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...unregelmäßig verteilt, im Frühjahr und Sommer mit Blätter.....	13 bis 25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...unregelmäßig verteilt, im Herbst und Winter ohne Blätter .....	17 bis 28	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...starker Vorlandbewuchs im Frühjahr und Sommer.....	6 bis 14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...starker Vorlandbewuchs im Herbst und Winter.....	9 bis 22	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Baumbewuchs ...			
...nur Stämme werden umströmt (evtl. Flächenabzugsverfahren!) .....	20 bis 33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...umströmtes dichtes Astwerk, bewachsen .....	13 bis 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...umströmter Jung- bzw. Kleinbewuchs, der sich nicht anschmiegt.....	6 bis 13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Gewählte Vorlandrauheiten: <math>k_{st,V,li} = 20 m^{1/3}/s</math> und <math>k_{st,V,re} = 20 m^{1/3}/s</math></b>			

Alle angegebenen Zahlenwerte wurden der Literatur entnommen, vgl.dazu [1],[2],[3],[4],[6],[9] und [8].

Vereinfachte Abschätzung des $k_{st,ges}$ -Wertes nach COWAN (→Kap. 5.2.1)				
Beschaffenheit des Sohlenmaterials ( $n_0$ )		Änderungen in der Gerinnequerschnittsform ( $n_2$ )		Einfluss von Bewuchs ( $n_4$ )
Erde..... 0,020	<input type="checkbox"/>	schwach .....0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	nieder ..... 0,005 bis 0,010 <input checked="" type="checkbox"/>
gebrochener Fels ..... 0,025	<input type="checkbox"/>	selten auftretend ....0,005	<input type="checkbox"/>	mittel ..... 0,010 bis 0,025 <input type="checkbox"/>
Feinkies..... 0,024	<input type="checkbox"/>	häufig auftretend ....0,010 bis 0,015	<input type="checkbox"/>	hoch ..... 0,025 bis 0,050 <input type="checkbox"/>
Grobkies..... 0,028	<input checked="" type="checkbox"/>			sehr hoch ..... 0,050 bis 0,100 <input type="checkbox"/>
Unregelmäßigkeit des Sohlenmaterials ( $n_1$ )		Einfluss von Hindernissen ( $n_3$ )		Mäandrierungsgrad ( $m_5$ )
vernachlässigbar ..... 0,000	<input type="checkbox"/>	vernachlässigbar ....0,000	<input checked="" type="checkbox"/>	gering ..... 1,000 <input type="checkbox"/>
gering ..... 0,005	<input type="checkbox"/>	gering .....0,010 bis 0,015	<input type="checkbox"/>	merklich ..... 1,150 <input checked="" type="checkbox"/>
mittel..... 0,010	<input checked="" type="checkbox"/>	merklich .....0,020 bis 0,030	<input type="checkbox"/>	stark ..... 1,300 <input type="checkbox"/>
stark ..... 0,020	<input type="checkbox"/>	stark.....0,040 bis 0,060	<input type="checkbox"/>	
<b>Berechnung des <math>k_{st,ges}</math>-Wertes nach COWAN: <math>k_{st,ges} = 1 / [(n_0+n_1+n_2+n_3+n_4) \cdot m_5] = \underline{20,7} \text{ m}^{1/3}/\text{s}</math></b>				
<b>Beschreibung der Bewuchseigenschaften (Angabe der Abmessungen etc.)</b>				
	Vorland links	Uferböschung links	Uferböschung rechts	Vorland rechts
Junge Bäume, Verästelung umströmt	---	---	---	---
Alte Bäume, nur Stamm umströmt	---	---	---	---
Junge Weiden und Röhrichte, die sich umlegen	---	---	---	---
Alte Weiden und Sträucher mit stabilen Widerstand	---	---	---	---
Sonstige	Kniehohes Gras	Erde	Erde	Kniehohes Gras
<b>Foto des Gewässerabschnittes</b>				
				
Film Nr.: 1    Foto Nr.: 7    Standort: oberhalb der Wiese				
Aufnahme/Blickrichtung: <input type="checkbox"/> nach OW <input checked="" type="checkbox"/> nach UW <input type="checkbox"/> vom rechten Ufer aus <input checked="" type="checkbox"/> vom linken Ufer aus <input type="checkbox"/> von Brücke				
Bemerkungen: Hier befand sich ursprünglich ein Durchlass, über den eine Straße verlief.				



Das mittlere Sohlgefälle in diesem Gewässerabschnitt wurde aus einer gewässerkundlichen Karte ermittelt:  $I_{So} = 0,0353$ .

Der Spitzenabfluss berechnet sich aus einer gegliederten Berechnung wie folgt:

Hauptgerinne.

$$A_F = 13,89 \text{ m}^2$$

$$h_{TI} = 0,20 \text{ m}$$

$$l_{U,ges} = 14,66 \text{ m}$$

$$l_{U,Bö} = 5,16 \text{ m}$$

EINSTEIN/HORTON:

$$k_{st,ges} = [14,66 / (5,16/30^{1,5} + 9,5/17^{1,5})]^{2/3}$$

$$= 19,8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

COWAN:

$$k_{st,ges} =$$

$$1 / [(0,028 + 0,01 + 0,003 + 0 + 0,005) \cdot 1,050]$$

$$= 20,7 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

Wähle  $k_{st,ges} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

$$v_F = 20 \cdot (0,0353)^{0,5} \cdot (13,89/14,66)^{2/3}$$

$$= 3,62 \text{ m/s}$$

$$Q_F = v_F \cdot A_F \approx 50 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vorland links:

$$A_{VI} = 2,72 \text{ m}^2$$

$$l_{U,VI} = 13,77 \text{ m}^2$$

$$v_{VI} = 20 \cdot (0,0353)^{0,5} \cdot (2,72/13,77)^{2/3}$$

$$= 1,27 \text{ m/s}$$

$$Q_{VI} \approx 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Gesamt:

$$Q_{ges} = Q_F + Q_{VI} = 53,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Aufgrund der vereinfachten Berechnung hatte das Hochwasserereignis einen Spitzenabfluss von ca.  $53 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 6.6 Vereinfachte Wasserspiegellagenberechnung

Die Hauptanwendung der GMS-Formel besteht in der Praxis darin, durch eine iterative Berechnung ausgehend von einem Anfangsquerschnitt die Wasserspiegellagen, welche sich bei leicht ungleichförmigen Abflussverhältnissen im weiteren Gewässerlauf einstellen, zu bestimmen.

Im Rahmen dieses Beispiels soll das Prinzip einer eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnung erläutert und vorgeführt werden.

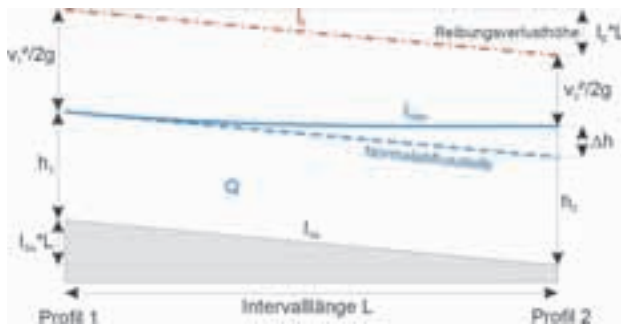


Abb. 82: Prinzipskizze des leicht ungleichförmigen Abflusses (hier verzögert) zur Ableitung der Energiebilanz nach „Bernoulli“.

Bei einer Energiebilanz der zwei eingrenzenden Querschnitten eines Intervalls der Länge  $L$  ergibt sich unter Anwendung der Gleichung von Bernoulli:

$$\begin{aligned} H_{E,1} &= H_{E,2} + I_E \cdot L \\ \Leftrightarrow I_{S0} \cdot L + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} &= h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + I_E \cdot L \\ \Leftrightarrow (h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + I_E \cdot L - I_{S0} \cdot L &= 0 \\ \Leftrightarrow \Delta h + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + I_E \cdot L - I_{S0} \cdot L &= 0 \end{aligned}$$

Nach der Kontinuitätsgleichung gilt:

$$Q = v \cdot A$$

Durch Einsetzen der GMS-Gleichung erhält man daraus:

$$Q = k_{st} \cdot \sqrt{I_E} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot A$$

Eine Umformung der Gleichung nach  $I_E$  ergibt:

$$I_E = \frac{Q^2}{k_{st}^2 \cdot A^2 \cdot r_{hy}^{4/3}} = \frac{v^2}{k_{st}^2 \cdot r_{hy}^{4/3}}$$

Falls im Längenabschnitt zwischen Querschnitt ① und Querschnitt ② Querschnittserweiterungen vorhanden sind, müssen zusätzlich zu den Reibungsverlusten noch lokale Verluste berücksichtigt werden. Das erfolgt durch Multiplikation der Geschwindigkeitshöendifferenz mit einem Faktor  $\varepsilon$ . Erfahrungsgemäß gilt

- bei allmählicher Erweiterung des Gerinnequerschnitts:  $\varepsilon = 2/3$

- bei plötzlicher Erweiterung des Gerinnequerschnitts:  $\varepsilon = 1/2$

Durch Einsetzen des Terms für das Energiegradienten und Berücksichtigung des  $\varepsilon$ -Beiwertes gilt nun für die Energiebilanz:

$$\Delta h = I_{S0} \cdot L - \frac{v^2}{k_{st}^2 \cdot r_{hy}^{4/3}} \cdot L - \varepsilon \cdot \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

Im Längsintervall  $L$  ändern sich bei ungleichförmigen Abflussverhältnissen sowohl die Fließgeschwindigkeit  $v$  als auch die Wassertiefe  $h$  und damit der hydraulische Radius  $r_{hy}$ . Es bietet sich an, die Reibungsverlusthöhe aus den Mittelwerten von  $v$  und  $r_{hy}$  in den Begrenzungsquerschnitten ① und ② des Berechnungsintervalls zu ermitteln:

$$\begin{aligned} v_m &= \frac{v_1 + v_2}{2} \\ \Delta v &= v_2 - v_1 \\ r_{hy,m} &= \frac{r_{hy,1} + r_{hy,2}}{2} \end{aligned}$$

Damit wird die Energiebilanzgleichung zwischen Querschnitt ① und ② zu:

$$\Delta h = I_{S0} \cdot L - \frac{v_m^2}{k_{st}^2 \cdot r_{hy}^{4/3}} \cdot L - \varepsilon \cdot \frac{v_m}{g} \cdot \Delta v$$

Bei einem natürlichen Flusslauf sind meistens an fixierten Querschnitten die Funktionen  $A = A(h)$  und  $r_{hy} = r_{hy}(h)$  und somit für einen gegebenen konstanten Abfluss  $Q$  die Funktionen  $v = v(h)$  bekannt. Zur Berechnung der Wasserspiegellagen in einem solchen Gewässerabschnitt wird dieser zunächst ausgehend von einem Startquerschnitt in feste Längenintervalle  $L_i$  eingeteilt. Die Spiegellagenberechnung beginnt am Startquerschnitt, wo die Fließverhältnisse bekannt sind.

Zunächst wird für den zweiten Begrenzungsquerschnitt des Längenintervalls  $L$ , an welchem die Fließverhältnisse unbekannt und zu ermitteln sind, eine Wassertiefe  $h_{2,\text{gesch.}}$  bzw. eine Wasserspiegellage angenommen. Damit lassen sich an diesem Querschnitt Werte für  $r_{\text{hy}}$  und  $v$  berechnen. Ferner können daraus die Mittelwerte  $v_m$ ,  $\Delta v$  und  $r_{\text{hy},m}$  abgeleitet werden. Durch Einsetzen dieser Werte in die Energiebilanzgleichung erhält man eine Größe  $\Delta h$ .

Sofern die angenommenen mit den berechneten Werten übereinstimmen ( $\Delta h \approx h_{2,\text{gesch.}} - h_1$ ), kann zum nächsten Längenintervall übergegangen werden, andernfalls ist die Annahme der Wassertiefe  $h_{2,\text{gesch.}}$  zu verbessern.

### Zahlenbeispiel

(in Anlehnung an Bollrich [3]):

Gegeben ist ein Trapezgerinne mit strömendem Abfluss:

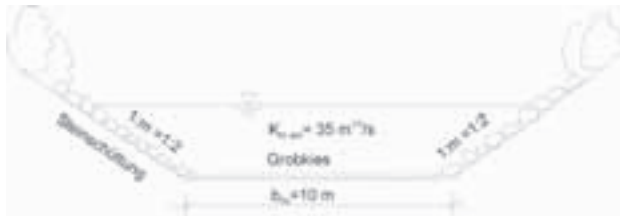


Abb. 83: Prinzipskizze des Gerinnequerschnittes.

Im Gerinne fließen  $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$  bei einem Sohlgefälle  $I_{S0} = 0,25 \text{ ‰}$  mit der Normalwassertiefe  $h = 2,25 \text{ m}$  strömend ab.

Ein Wehr staut bei  $x = 0$  das Wasser bis auf eine Tiefe von  $3,10 \text{ m}$  auf. Mit Hilfe einer ein-dimensionalen Wasserspiegellagenberechnung soll nun der Verlauf der Wasserspiegellinie infolge des Aufstau im Oberwasser der Wehranlage berechnet und dargestellt werden.

Es gelten folgende Formeln für das Trapezgerinne:

$$A = b_{S0} \cdot h + m \cdot h^2 = 10 \cdot h + 2 \cdot h^2$$

$$I_U = b_{S0} + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2} = 10 + 4,47 \cdot h$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{25}{10 \cdot h + 2 \cdot h^2}$$

Die Intervalllänge wird zu  $L = 1225 \text{ m}$  festgelegt. Infolge gleichbleibender Gerinnegeometrie

wird  $\varepsilon = 1$  gesetzt. Die Ergebnisse der Berechnung sind auf der folgenden Seite tabellarisch dargestellt.

Zur besseren Veranschaulichung soll die Berechnung der Wasserspiegellage bei Station  $-1225$  noch einmal ausführlich vorgeführt werden:

#### Eingangsdaten:

Abfluss  $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ , konstant  
 Sohlgefälle  $I_{S0} = 0,25 \text{ ‰} = 0,00025$   
 STRICKLER-Beiwert  $k_{st} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$   
 Intervalllänge  $L = 1225 \text{ m}$

#### Station 0:

Ort: Wehranlage  
 $h_0 = 3,10 \text{ m}$  (gegeben)  
 $A_0 = 10 \cdot 3,10 + 2 \cdot 3,10^2 = 50,22 \text{ m}^2$   
 $I_{U,0} = 10 + 4,47 \cdot 3,10 = 23,86 \text{ m}$   
 $r_{\text{hy},0} = A_0 / I_{U,0} = 50,22 / 23,86 = 2,104 \text{ m}$   
 $v_0 = Q / A_0 = 25 / 50,22 = 0,498 \text{ m/s}$

#### Station -1225

Ort:  $1225 \text{ m}$  stromaufwärts der Wehranlage  
 Wasserspiegeldifferenz geschätzt

$\Delta h_{\text{gesch}} = 0,204 \text{ m}$

resultierende Wassertiefe im Querschnitt:

$h_1 = 2,896 \text{ m}$   
 $A_1 = 10 \cdot 2,896 + 2 \cdot 2,896^2 = 45,76 \text{ m}^2$   
 $I_{U,1} = 10 + 4,47 \cdot 2,896 = 22,95 \text{ m}$   
 $r_{\text{hy},1} = A_1 / I_{U,1} = 45,76 / 22,95 = 1,993 \text{ m}$   
 $v_1 = Q / A_1 = 25 / 45,76 = 0,547 \text{ m/s}$

#### Energiebilanz

$r_{\text{hy},m} = (2,104 + 1,993) / 2 = 2,049 \text{ m}$   
 $v_m = (0,498 + 0,547) / 2 = 0,522 \text{ m/s}$   
 $\Delta v = 0,547 - 0,498 = -0,049 \text{ m/s}$   
 $\Delta h_{\text{ber}} = 0,200 \text{ m} \approx 0,204 \text{ m} = \Delta h_{\text{gesch}} \checkmark$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Station	L [m]	h [m]	$\Delta h_{\text{gesch}}$ [m]	A [m <sup>2</sup> ]	I <sub>u</sub> [m <sup>2</sup> ]	r <sub>hy</sub> [m]	v [m/s]	r <sub>hy,m</sub> [m]	v <sub>m</sub> [m/s]	$\Delta v$ [m/s]	$\Delta h_{\text{ber}}$ [m]
0	1225	3,100	0,204	50,22	23,86	2,104	0,498	2,049	0,522	-0,049	0,204
-1225		2,869		45,73	22,95	1,993	0,547				
-2450	1225	2,721	0,175	42,02	22,17	1,895	0,595	1,944	0,570	-0,048	0,175
-3675		2,579		39,09	21,53	1,815	0,640				
-4900	1225	2,471	0,142	36,92	21,05	1,754	0,677	1,855	0,617	-0,045	0,142
-6125		2,393		35,38	20,70	1,709	0,707				
-7350	1225	2,340	0,108	34,35	20,46	1,679	0,728	1,784	0,658	-0,037	0,108
-8575		2,306		33,70	20,31	1,659	0,742				
-9800	1225	2,284	0,078	33,27	20,21	1,646	0,751	1,732	0,692	-0,030	0,078
-11025		2,271		33,02	20,16	1,638	0,757				
	1225		0,053					1,694	0,717	-0,021	0,053
	1225		0,034					1,669	0,735	-0,014	0,034
	1225		0,022					1,653	0,745	-0,009	0,022
	1225		0,013					1,642	0,745	-0,006	0,013

### Erklärung der Spalten:

- Spalte 1: Die Wehranlage wird als Station 0 definiert. Die nachfolgenden Stationen befinden sich jeweils im Abstand L stromaufwärts der Wehranlage.
- Spalte 2: Intervalllänge L, die von jeweils zwei Stationen begrenzt wird.
- Spalte 3: Wassertiefe bei der jeweiligen Station. Zum Berechnungsanfang wird die in der Aufgabenstellung gegebene Randbedingung der aufgestauten Wassertiefe von h = 3,10 m an der Wehranlage angenommen. Die Wasserspiegellagenberechnung wird dann entgegen der Fließrichtung nach Oberwasser durchgeführt.
- Spalte 4: Geschätzte Wassertiefe im oberwasserseitigen Querschnitt, das das Intervall L einschließt.
- Spalte 5...8: Berechnung der Querschnittsparameter in den jeweiligen Stationen für die entsprechenden Wassertiefen.
- Spalte 9: Berechnung des mittleren hydraulischen Radius:  $r_{hy,m} = (r_{hy,1} + r_{hy,2})/2$
- Spalte 10: Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit:  $v_m = (v_1 + v_2)/2$
- Spalte 11: Berechnung der Geschwindigkeitsdifferenz:  $\Delta v = v_0 - v_1$
- Spalte 12: Kontrolle der geschätzten Wassertiefe durch Berechnung der Energiebilanz zwischen den eingrenzenden Querschnitten:

$$\Delta h_{ber} = I_{So} \cdot L - \frac{v_m^2}{k_{st}^2 \cdot r_{hy,m}^2} \cdot L - \varepsilon \cdot \frac{v_m}{g} \cdot \Delta v \approx \Delta h_{gesch}$$

Auf der folgenden Seite ist der Verlauf der Wasserspiegellage infolge des Aufstau bei Station 0 dargestellt.



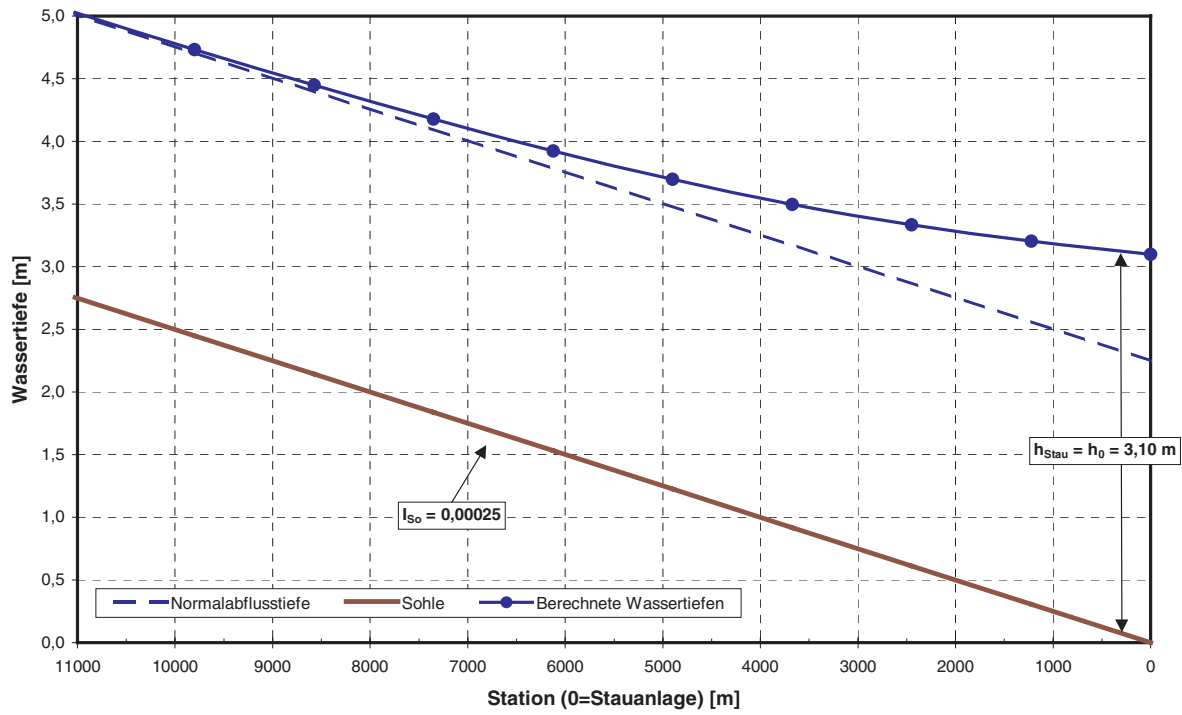


Abb. 84: Darstellung der Wasserspiegellage.

## 7. Verwendete Formelzeichen (nach DIN 4044)

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\gamma$	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})^2$	Wichte einer Flüssigkeit ( $= \rho \cdot g$ )
$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	Dichte einer Flüssigkeit
$\alpha$	°	Sohlneigungswinkel bzw. Verbauungsgrad bei Gerinneinbauten
$\lambda$	-	dimensionsloser Rohrreibungsbeiwert
$\tau_0$	$\text{N}/\text{m}^2$	Schubspannung
$A$	$\text{m}^2$	senkrecht durchflossene Querschnittsfläche
$b_{\text{So}}$	m	Sohlbreite
$b_{\text{sp}}$	m	Wasserspiegelbreite
$C$	$\text{m}^{1/2}/\text{s}$	Geschwindigkeitsbeiwert
$c_{\text{We}}$	m/s	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen
$F_G$	N	Gewichtskraft eines Wasservolumens
$F_R$	N	Reibungskraft
$g$	$\text{m}/\text{s}^2$	Erdbeschleunigung
$h$	m	Wassertiefe
$h_{\text{gr}}$	m	Grenztiefe
$h_v$	m	Verlusthöhe
$I_E$	-	Energieliniengefälle
$I_{\text{So}}$	-	Sohlliniengefälle
$I_{\text{sp}}$	-	Wasserspiegelliniengefälle
$k_{\text{st}}$	$\text{m}^{1/3}/\text{s}$	Strickler-Beiwert oder Rauheitsbeiwert
$L$	m	Abstand zwischen zwei betrachteten Querschnitten
$l_U$	m	benetzter Umfang
$n$	$\text{s}/\text{m}^{1/3}$	Manning-Beiwert
$p$	$\text{N}/\text{m}^2$	Druckkraft pro Fläche
$p/\gamma$	m	Druckhöhe
$Q$	$\text{m}^3/\text{s}$	Abfluss
$q$	$\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$	spezifischer Abfluss pro Breitereinheit
$r_{\text{hy}}$	m	hydraulischer Radius ( $= A/l_U$ )
$v$	m/s	Fließgeschwindigkeit
$v^2/(2g)$	m	Geschwindigkeitshöhe
$v_{\text{gr}}$	m/s	Grenzfließgeschwindigkeit
$v_m$	m/s	über einen durchflossenen Querschnitt gemittelte Fließgeschwindigkeit

## 8. Literaturverzeichnis

- [1] ZUPPKE  
Hydromechanik im Bauwesen  
4. Auflage; Berlin 1992, Bauverlag GmbH
- [2] RÖSSERT  
*Hydraulik im Wasserbau*  
9. Auflage; München 1994, Oldenbourg Verlag GmbH
- [3] BOLLRICH  
*Technische Hydromechanik 1*  
4. Auflage; Dresden 1996, Verlag für Bauwesen GmbH
- [4] LANGE ; LECHER  
*Gewässerregelung, Gewässerpflege*  
3. Auflage; Hamburg 1993, Verlag Parey
- [5] DITTRICH  
*Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer*  
Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH);  
Dissertation; Karlsruhe 1999
- [6] NAUDASCHER  
*Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*  
2. Auflage; Wien 1992, Springer-Verlag
- [7] COWAN  
*Estimating hydraulic roughness coefficients*  
In: Agricultural Engineering, Vol 37, No. 7, pp 473-475, July 1956
- [8] VEN TE CHOW  
*Open Channel Hydraulics*  
Tokyo 1959, Verlag Mc Graw-Hill Kogakusha
- [9] SCHRÖDER / EULER / SCHNEIDER / KNAUFF  
*Grundlagen des Wasserbaus*  
3. Auflage; Düsseldorf 1994, Werner-Verlag

- [10] KÖNEMANN  
*Der wechselseitige Einfluß von Vorland und Flußbett auf das Widerstandsverhalten offener Gerinne mit gegliederten Querschnitten*  
Mitteilung des Instituts für Wasserbau der Universität Darmstadt; Dissertation; Darmstadt 1980
- [11] DVWK (HRSG.)  
*Hydraulische Berechnung von Fließgewässern – Merkblatt 220/1991*  
Hamburg 1991, Verlag Parey
- [12] SCHRÖDER / PRESS  
*Hydromechanik im Wasserbau*  
Berlin 1966, Ernst-Verlag
- [13] PETSCHALLIES  
*Entwerfen und Berechnen im Wasserbau und Wasserwirtschaft*  
Berlin 1989, Bauverlag
- [14] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (HRSG.)  
*Ökologische Untersuchungen an der ausgebauten unteren Murr 1977 bis 1982*  
Ludwigsburg 1985
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. DIN (HRSG.)  
*Wasserwesen, Begriffe, Normen – DIN-Taschenbuch 211*  
3. Auflage; Berlin 1996, Beuth-Verlag
- [16] DVWK (HRSG.)  
*Anwendung von Fließformeln bei naturnahem Gewässerausbau – Schriften 72*  
Bonn 1985, Verlag Parey
- [17] TIMM  
*Wasserbau*  
14. Auflage, Stuttgart 1967, Verlag B.G. Teubner  
DVWK [HRSG.]; MERTENS
- [18] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG  
*Gewässergeometrie*  
Reihe „Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie“, Karlsruhe 2002



## Weiterführende Literatur

*Hydraulisch-sedimentologische Berechnungen naturnah gestalteter Fließgewässer*  
Mitteilungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau – Band 25

Bonn 1994; Wirtschafts- und Verlags-Gesellschaft Gas und Wasser

SPREAFICO [RED.]

*Abschätzung der Abflüsse in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung*

Bericht zum Teilprojekt C des nationalen Forschungsprogrammes Nr. 2 „Grundlegende Probleme des Schweizerischen Wasserhaushaltes“

Bern 1985; Verlag Kümmerly & Frey

SCHULZ

*Zur Näherungsberechnung des Abflusses in naturnah gestalteten Fließgewässern*

Technische Universität Berlin; Dissertation; Berlin 1987

KRAUSE

*Bewuchs an Wasserläufen*

Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

Bonn 1985

KOHANE

*Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluss in Fließgewässern mit überströmten Vorländern*

Universität Stuttgart, Mitteilungen des Institut für Wasserbau – Heft 73

Dissertation; Stuttgart 1990

KÖLLA

*Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung*

Technische Hochschule Zürich

Dissertation; Zürich 1986

PASCHE

Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung  
Rheinisch-Westfälische Hochschule, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Dissertation; Aachen 1984

ROUVE [HRSG.]

*Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau*

Ergebnisse aus dem Schwerpunktprogramm „Anthropogene Einflüsse auf hydrologische Prozesse“  
der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

Weinheim 1987; VCH-Verlagsgesellschaft

VAN RINSUM

*Der Abfluss in offenen natürlichen Wasserläufen*

Mitteilung aus dem Gebiet des Wasserbaues und der Baugrundforschung – Heft 7

2. Auflage; Berlin 1950; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn

BECKER

Der Einfluss von kurzen Gehölzstreifen auf den Hochwasserabfluss in Flüssen mit gegliedertem Querschnitt  
Universität Karlsruhe, Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik – Heft 202

Dissertation; Karlsruhe 1999

## 9. Bildnachweis

verändert nach [9]      Abb. 7, 8, 10, 11

verändert nach [1]      Abb. 9

IWK      Abb. 12 bis 15, 17 bis 19, 23,24, 40, 41, 69, 75, 77 bis 84

verändert nach [4]      Abb. 16, 42, 47

verändert nach [8]      Abb. 20

LfU      alle weiteren Abbildungen

**Veröffentlichungen der Reihe  
Handbuch Wasser 2  
ISSN 0946-0675**

<b>Titel</b>	<b>Band</b>	<b>Jahr der Herausgabe</b>	<b>Preis (falls lieferbar)</b>
<b>Gewässerkundliche Beschreibung</b> Abflußjahr 1990	1	1991	vergriffen
<b>Bauweisen des naturnahen Wasserbaus</b> <b>Umgestaltung der Enz in Pforzheim</b>	2	1991	15 €
<b>Gewässerentwicklungsplanung</b> - Leitlinien -	3	1992	15 €
<b>Übersichtskartierung der morphologischen Naturnähe von Fließgewässern (Methode)</b> - Vorinformation -	4	1992	vergriffen
<b>Regionalisierung hydrologischer Parameter für Niederschlag-Abfluß-Berechnungen</b> - Grundlagenbericht - - Programmdiskette -	5	1992	vergriffen
<b>Ökologie der Fließgewässer</b> Niedrigwasser 1991	6	1992	20 €
<b>Biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung</b> - Arbeitsanleitung - - Programmdiskette -	7	1992	vergriffen
<b>Verkrautung von Fließgewässern</b> Einflußfaktoren, Wechselwirkungen, Kontrollmaßnahmen - Literaturstudie -	8	1993	vergriffen
<b>Gewässerkundliche Beschreibung</b> Abflußjahr 1992	9	1993	15 €
<b>Kontrolle des Japan-Knöterichs an Fließgewässern</b> I. Erprobung ausgewählter Methoden	10	1994	15 €
<b>Gewässerrandstreifen</b> Voraussetzung für die naturnahe Entwicklung der Gewässer	11	1994	15 €
<b>Gewässerkundliche Beschreibung</b> Hochwasser Dezember 1993	12	1994	13 €
<b>Handbuch der stehenden Gewässer in Baden-Württemberg</b> Regierungsbezirke Freiburg, Karlsruhe und Stuttgart	13	1994	vergriffen
<b>Handbuch der stehenden Gewässer in Baden-Württemberg</b> Regierungsbezirk Tübingen	14	1994	vergriffen
<b>Übersichtskartierung des morphologischen Zustands der Fließgewässer in Baden-Württemberg 1992/1993</b>	15	1994	13 €

<b>Titel</b>	<b>Band</b>	<b>Jahr der Herausgabe</b>	<b>Preis (falls lieferbar)</b>
<b>Umweltverträglichkeitsprüfung bei Wasserbauvorhaben nach § 31 WHG Leitfaden Teil I: Verfahren</b>	16	1994	vergriffen
<b>Morphologischer Zustand der Fließgewässer in Baden-Württemberg</b> Auswertung und Interpretation der Ergebnisse der Übersichtskartierung 1992/93	17	1995	13 €
<b>Kontrolle des Japan-Knöterichs an Fließgewässern</b> II. Untersuchungen zu Biologie und Ökologie der neophytischen Knöterich-Arten	18	1995	15 €
<b>Gesamtkonzept Naturnahe Unterhaltung von Fließgewässern</b> Möglichkeiten, Techniken Perspektiven	19	1995	8 €
<b>Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern</b> Teil III: Dokumentation der Entwicklung ausgewählter Pilotvorhaben, erste Zwischenberichte der Erfolgskontrolle	20	1995	15 €
<b>Umweltverträglichkeitsprüfung bei Wasserbauvorhaben nach § 31 WHG</b> Leitfaden Teil III: Bestimmung des Untersuchungsrahmens, Untersuchungsmethoden	21	1995	12 €
<b>Schadstoffdatei Rhein</b> Dokumentation	22	1996	vergriffen
<b>Schadstofftransport bei Hochwasser</b> Neckar, Rhein und Donau im Januar 1995	23	1996	15 €
<b>Schwermetalle in den Sedimenten der Fließgewässer Baden-Württembergs</b>	24	1996	11 €
<b>Bauweisen des naturnahen Wasserbaus</b> Dokumentation und Bewertung am Pilotprojekt Enz/Pforzheim 1990 - 1995	25	1996	11 €
<b>Entwicklung der Fließgewässerbeschaffenheit - chemisch, physikalisch, biologisch -</b> Stand 1995	26	1996	11 €
<b>Das Abflußjahr 1994 - ein Hochwasserjahr</b>	27	1996	vergriffen
<b>Pilotprojekt "Konfliktarme Baggerseen (KaBa)"</b> - Statusbericht -	28	1997	6 €
<b>Meßnetz-Zentrale</b> <b>Meßnetzprogramm</b>	29	1996	vergriffen

Titel	Band	Jahr der Herausgabe	Preis (falls lieferbar)
<b>Pappeln an Fließgewässern</b>	30	1996	15 €
<b>Rechtsgrundlagen der Gewässerunterhaltung</b> Teil I Überblick	31	1996	8 €
<b>Baggerseeuntersuchungen in der Oberrheinebene</b> Auswertung der Sommerbeprobung 1994 und Frühjahrsbeprobung 1995	32	1997	vergriffen
<b>Nährstoff- und Schadstoffeinträge in Baggerseen (Literaturstudie)</b>	33	1996	15 €
<b>Biologische Freiwasseruntersuchungen Rhein-Neckar-Donau</b> - Planktonentwicklung - Bioaktivitäten - Stoffumsätze - 1994	34	1997	vergriffen
<b>Untersuchung der gentoxischen Wirkung von Gewässern und Abwässern</b>	35	1997	vergriffen
<b>Dammscharten in Lockerbauweise bei Hochwasserrückhaltebecken</b>	36	1997	12 €
<b>Ökologische Bewertung von Fließgewässern in der Europäischen Union und anderen Ländern (Literaturstudie)</b>	37	1997	8 €
<b>Saisonale, horizontale und vertikale Zooplankton-verteilungsmuster</b> Eine Fallstudie für den Grötzingen Baggersee	38	1997	vergriffen
<b>Methodologische Untersuchungen zur Ermittlung des Biochemischen Sauerstoffbedarfs des Sediments und des Wasserkörpers in den Baggerseen der Oberrheinebene</b>	39	1997	vergriffen
<b>Biologische Freiwasseruntersuchungen in Rhein, Neckar, Donau.</b> Berichtsjahr 1995-1996	40	1997	6 €
<b>Regionale Bachtypen in Baden-Württemberg</b> Arbeitsweisen und exemplarische Ergebnisse an Keuper- und Gneisbächen	41	1997	18 €
<b>Statistische Untersuchung langfristiger Veränderungen des Niederschlags in Baden-Württemberg</b>	42	1997	14 €
<b>Studie über ökohydraulische Durchlaufbauwerke für regulierbare Hochwasserrückhalteräume</b>	43	1998	vergriffen
<b>Gewässerentwicklung in Baden-Württemberg</b> Teil II Gewässerentwicklungskonzept - Loseblattsammlung -	44	1998	vergriffen
<b>Rauhe Rampen in Fließgewässern</b>	45	1998	vergriffen
<b>Gewässergeometrie</b>	46	1998	vergriffen

Titel	Band	Jahr der Herausgabe	Preis (falls lieferbar)
<b>Die Reihe „Handbuch Wasser 2“ wird unter der Bezeichnung „Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie“ fortgesetzt</b> <b>ISSN 1436-7882</b>			
<b>Naturgemäße Bauweisen</b> Unterhaltungsmaßnahmen nach Hochwasserereignissen	47	1998	12 €
<b>Gewässerentwicklungsplanung</b> Teil I Grundlagen und Faltblatt	48	1998	11 €
<b>Gewässergütekarte Baden-Württemberg</b>	49	1998	21 €
<b>Beschaffenheit der Fließgewässer</b> Jahreskatalog 1997 CD-ROM	50	1998	vergriffen
<b>Fließgewässerversauerung im Schwarzwald</b> Ökologische Bewertung auf der Basis des Diatomeenbenthons	51	1999	vergriffen
<b>Ab- und Umbauprozesse in Baggerseen und deren Einfluß auf das Grundwasser</b> Literaturauswertung	52	1999	vergriffen
<b>Die Gewässerlandschaften Baden-Württembergs</b>	53	1999	vergriffen
<b>Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeit in Baden-Württemberg</b>	54	1999	41 €
<b>Unterhaltung und Pflege von Gräben</b>	55	1999	11 €
<b>Hydrochemische und biologische Merkmale regionaler Bachtypen in Baden-Württemberg</b>	56	1999	30 €
<b>Die heutige potentielle natürliche Vegetation an Fließgewässern in Baden-Württemberg</b>	57	1999	vergriffen
<b>Überwachung der Fließgewässerbeschaffenheit in Baden-Württemberg</b> - Vorgehenskonzept -	58	1991	kostenlos
<b>Beschaffenheit der Fließgewässer</b> Jahresdatenkatalog 1998 CD-ROM	59	2000	31 €
<b>Niederschlagsdaten Baden-Württemberg</b>	60	2000	8 €
<b>Zustand der Baggerseen in der Oberrheinebene</b>	61	2000	9 €

<b>Titel</b>	<b>Band</b>	<b>Jahr der Heraus- gabe</b>	<b>Preis (falls lieferbar)</b>
<b>Seenphysikalische Prozesse in Baggerseen</b> Modellgestützte Bewertungs – und Entscheidungshilfen -	62	2000	15 €
<b>Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern</b>	63	2000	16 €
<b>Beschaffenheit der Fließgewässer</b> Jahresdatenkatalog 1999 CD-ROM	64	2001	30 €
<b>Das Hochwasser vom Oktober/ November 1998</b>	65	2000	12 €
<b>Fließgewässer in Baden-Württemberg als Lebensraum ausgewählter Artengruppen</b>	66	2001	9 €
<b>Untersuchungen zum Vorkommen von Xenobiotika in Schwebstoffen und Sedimenten Baden-Württembergs</b>	67	2001	9 €
<b>Schadstoff-Informationssystem-Wasser (SIWAS)</b> CD-ROM	68	2001	15 €
<b>Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg</b> CD-ROM	69	2001	30 €
<b>Gewässerstruktur- gütekartierung in Baden-Württemberg</b>	70	2001	11 €
<b>Beschaffenheit der Fließgewässer</b> Jahresdatenkatalog 2000 CD-ROM	71	2002	10 €
<b>Gewässerentwicklung in Baden-Württemberg</b> <b>Leitfaden Teil 3</b> Arbeitsanleitung zur Erstellung von Gewässerentwicklungsplänen	72	2002	12 €
<b>Aromatische Sulfonate in Oberflächengewässern, Schwebstoffen und Sedimenten Baden-Württembergs</b>	73	2002	9 €