

## DIPLOMARBEIT Master Thesis

### **Beitrag zur Auswahl von Rauheitsbeiwerten in der Gerinnehydraulik**

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

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard PRENNER  
und  
Oberrat Dipl.-Ing. Hubert HONSOWITZ

E 222

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
Forschungsbereich für Wasserbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Armin Alber  
Matr.Nr.: 0926037  
Marktstraße 45  
7521 EBERAU

Wien, März 2015



## **Danksagung**

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Oberrat Dipl.-Ing. Hubert Honsowitz bedanken, welcher mir diese Diplomarbeit ermöglicht hat. Er hat dieses interessante Thema vorgeschlagen und so den Grundstein meiner Arbeit gelegt. Außerdem hat er mir immer wieder interessante Inputs, sowie Literaturhinweise gegeben.

Weiters danke ich Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Prenner für die fortwährende, tatkräftige Unterstützung und die Korrektur meiner Abschlussarbeit. Durch einige relativ kurzfristig vereinbarte Treffen und seine fachlich wertvollen Ratschläge war es möglich, meine Abschlussarbeit ohne größere Verzögerungen zu schreiben.

Mein Dank gilt weiters meinen Eltern für die finanzielle und mentale Unterstützung. Ohne sie wäre das Studium sehr viel schwieriger geworden.

Danke sage ich auch meinen Brüdern und meiner Schwester für die vielen Stunden der Zerstreuung und Ablenkung vom Unistress. Außerdem möchte ich mich für die vielen Arbeiten, die sie für mich verrichtet und Dienste, die sie mir geleistet haben, bedanken.

Abschließend möchte ich meinen Freunden und meiner Freundin für ihr Entgegenkommen und Verständnis bedanken, wenn ich nicht viel Zeit für sie hatte. Außerdem hatten sie für mich immer ein offenes Ohr auch während des Studiums; ich konnte so Freude, aber auch Leid teilen.

## Kurzfassung

### **Beitrag zur Auswahl von Rauheitsbeiwerten in der Gerinnehydraulik**

Bei vielen hydraulischen Berechnungen im Flussbau ist es unumgänglich, Rauheits- bzw. Widerstandsbeiwerte festzulegen. Die folgende Arbeit soll es ermöglichen, innerhalb kurzer Zeit den richtigen Rauheitsbeiwert für offene Gerinne zu finden.

Im ersten Teil der Arbeit werden die notwendigen hydraulischen Grundlagen und die Bedeutung des Rauheitsbeiwertes erläutert.

Das nächste Kapitel gibt einen umfangreichen Überblick über bereits durchgeführte Untersuchungen und deren Ergebnisse. Neben vielen Tabellenwerten sind auch fotografische Abbildungen zur einfacheren Auswahl eines richtigen Rauheitsbeiwertes dargestellt.

Weiters umfasst die Arbeit ausführlich dargelegte Berechnungen und eine Zusammenfassung der Ergebnisse für ausgewählte Fließquerschnitte.

Im Nahbereich von Pegelstellen wurde mittels Theodoliten das Sohlgefälle der Bäche gemessen und Fließgeschwindigkeiten mithilfe eines Schwimmkörpers festgestellt. Anhand dieser und vom Wasserportal Burgenland bzw. vom Ministerium über viele Jahre aufgezeichnete Daten konnte ein Rauheitsbeiwert für unterschiedliche Durchflüsse ermittelt werden.

Die Berechnungen wurden mit der Fließformel nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER, DARCY-WEISBACH und INDLEKOFER durchgeführt und mittels des Schätzverfahrens nach COWAN und einem Verfahren, basierend auf EINSTEIN und HORTEN auf Richtigkeit kontrolliert. Die Ergebnisse aus berechneten und gemessenen Werten konnten so miteinander verglichen werden.

Abschließend wurde für den Tauchenbach bei Altschlaining mithilfe der Zusammenstellung durchgeführter Untersuchungen der Strickler-Beiwert abgeschätzt. Ein Vergleich zu den errechneten Ergebnissen konnte angestellt werden.

## **Abstract**

### **Contribution to the selection of roughness coefficients in channel hydraulics**

In many hydraulic calculations it is necessary to define roughness coefficients (Manning's-n). This work should simplify the selection of a proper roughness coefficient for open channels.

The first part of the work describes basic hydraulic principles and also the importance of roughness coefficients.

The next chapter provides a comprehensive overview of completed studies and their results. Many table values as well as figures aid the easier selection of a proper roughness coefficient.

Furthermore the study includes detailed calculations and a summary of the results for selected flow cross-sections.

Close to discharge sites the slope and the flow velocity has been measured. Based on that data and using collected information from the hydrographic office of Burgenland ("Wasserportal Burgenland") and the homepage ehyd from the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management (BMLFUW) it was possible to calculate roughness coefficients for several discharges.

The results were verified by using different calculation methods (MANNING formula, DARCY-WEISBACH equation, INDLEKOFER, COWAN and EINSTEIN and HORTEN). This enabled a comparison of the measured with the recalculated values.

Finally, for the Tauchenbach in Altschlaining, a roughness coefficient was estimated by using the conducted studies. It was possible to compare the results.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Hydraulische Grundlagen	3
2.1	Definitionen	3
2.1.1	Gerinneströmungen	3
2.1.2	„Natürlichkeit“ von Gerinnequerschnitten	4
2.1.3	Begriffe zur Quantifizierung von Oberflächenbeschaffenheiten	4
2.2	Hydrodynamische Grundlagen	5
2.3	Voraussetzungen für die Verwendung von Fließformeln	8
2.4	Fließformeln für allgemeine Gerinne	8
2.4.1	Fließformel nach DARCY-WEISBACH	10
2.4.2	Fließformel nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER	15
2.5	Vor- und Nachteile der verwendeten Fließformeln	17
2.6	Berechnung von Gerinnen mit unterschiedlicher Sohl- und Böschungsrauheit	20
2.6.1	Erste Überlagerungsmethode nach INDLEKOFER	21
2.6.2	Näherung für den Reibungsansatz nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER	23
2.7	Abschätzung des $k_{St}$ -Wertes nach COWAN	23
2.8	Besonderheiten bei der Berechnung von Widerstandsbeiwerten	25
2.8.1	Durchflusshysterese	25
2.8.2	Gerinne mit gegliedertem Querschnitt und Vegetation	26
2.8.3	Gerinne mit beweglicher Sohle	28
3	Zusammenstellung von Rauheitsbeiwerten aus der Literatur	30
3.1	Werte für die äquivalente Sandrauheit $k_S$	30
3.2	Werte für den Strickler-Beiwert ( $k_{St}$ -Wert)	32
3.2.1	Untersuchungen von VEN TE CHOW	34
3.2.2	Untersuchungen von BARNES	36
3.2.3	Untersuchungen von SPREAFICO, HODEL und KASPAR	43
3.2.4	Untersuchungen der LfU Baden-Württemberg	47
3.2.5	Untersuchungen von KNAUF	52
3.2.6	Untersuchungen von LAND & WATER AUSTRALIA	54
3.2.7	Interpretation der vorliegenden Untersuchungen und Ergebnisse	56
3.2.8	Untersuchungen von PAUGAM und DELGYANSKA	56
4	Ermittlung von Rauheitsbeiwerten für ausgewählte Fließquerschnitte	62
4.1	Pinka bei Pinkafeld	65
4.2	Pinka bei Oberwart	76
4.3	Zickenbach (Oberwart) bei Siget in der Wart	85
4.4	Tauchenbach bei Altschlaining	95
4.5	Raab bei Neumarkt	104
4.6	Lafnitz bei Eltendorf	109

---

5	Auswahl eines $k_{St}$ -Wertes mithilfe angeführter Untersuchungen	114
6	Zusammenfassung und Ausblick	118
7	Anhang	120
7.1	Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen	120
7.2	Weiterführende Literatur	123
7.3	Vermessung Sohlgefälle am 23. 01. 2015	125
7.4	Längsschnitte der Sohlen in den Nahbereichen der Pegelstellen	131
7.4.1	Pinka beim Pegel in Pinkafeld (M = 1:1000/100 – 10-fach überhöht)	131
7.4.2	Pinka beim Pegel in Oberwart (M = 1:1000/100 – 10-fach überhöht)	132
7.4.3	Zickenbach beim Pegel in Siget in der Wart (M = 1:1000/100 – 10-fach überhöht)	133
7.4.4	Tauchenbach beim Pegel in Altschlaining (M = 1:1000/100 – 10-fach überhöht)	134
7.5	Abbildungsverzeichnis	135
7.6	Tabellenverzeichnis	141
8	Literatur	143



## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Bei den meisten Berechnungen der Gerinnehydraulik ist es unumgänglich, Rauheits<sup>1</sup>- bzw. Widerstandsbeiwerte für das Gerinne und - bei weiterreichenden Untersuchungen - das Vorland festzulegen. Diese Werte haben höchsten Einfluss auf die Abflusskapazität. Die Bedeutung einer korrekten Bestimmung dieser wird oftmals unterschätzt.

Obwohl es nach dem aktuellen Wissensstand eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Bestimmung von Rauheitsbeiwerten gibt, fällt es in der Praxis trotzdem schwer, in kurzer Zeit einen richtigen Wert zu finden (v.a. für naturnahe<sup>2</sup> Gerinnequerschnitte).

Eine Vielzahl von Untersuchungsmethoden zur Bestimmung von Rauheiten sind zudem nur im Labor möglich (siehe [DVWK, 1990]). Diese sind zumeist sehr aufwendig. Außerdem sind die Rauheiten naturnaher Oberflächen, wie z.B. natürlicher Bewuchsformen nicht mit mechanischen oder experimentellen Verfahren bestimmbar.

Schätzverfahren wie z.B. eine Bestimmung von Werten für die äquivalente Sandrauheit ( $k_S$ -Werte) bzw. Strickler-Beiwerte ( $k_{St}$ -Werte) für die Gerinnerauheit mittels Tabellen erfordern einen hohen Wissensstand des Anwenders und liefern oft nicht korrekte bzw. ungenaue Ergebnisse (die Begriffe „ $k_S$ -Wert“ und „ $k_{St}$ -Wert“ werden im Kapitel 2.1.3 näher erklärt). Außerdem variieren die Werte in der Literatur stark (siehe dazu Kapitel 3) und verändern sich bei unterschiedlichen Wassertiefen.

Die folgende Arbeit soll es ermöglichen, innerhalb kurzer Zeit den richtigen Rauheitsbeiwert für offene, natürliche Gerinne zu finden. Weiters soll die Veränderung des  $k_{St}$ -Wertes für verschiedene Gerinnequerschnitte in Abhängigkeit von Wasserstand und Durchfluss dargestellt werden.

Zu diesem Zweck wurden neben einer umfangreichen Auflistung vorhandener Untersuchungen verschiedene Gerinnequerschnitte im Bereich östlicher Flach- und Hügelländer Österreichs fotografiert. Im Nahbereich von vier Pegelstellen wurde das Sohlgefälle vermessen und die Fließgeschwindigkeit mit einem Schwimmkörper festgestellt. Aus den so gewonnenen Daten wurden Strickler-Beiwerte berechnet. Auch mithilfe von Wasserstands- und Durchflussdaten vom Wasserportal Burgenland wurde im

---

<sup>1</sup> „Rauheitsbeiwerte“ ist der heute übliche, in vielen Veröffentlichungen (siehe angeführte Literatur im Anhang) verwendete Begriff für  $k_S$ - oder  $k_{St}$ -Werte. Trotzdem werden – v.a. in älterer Literatur –  $k_{St}$ -Werte oft als „Rauigkeitsbeiwerte“ (oder nach alter Rechtschreibung als „Rauhigkeitsbeiwerte“) bezeichnet. Weil es verwirrend wäre, zwischen den Begriffen „hin- und herzuspringen“, wird in dieser Arbeit lediglich der Begriff „Rauheitsbeiwerte“ verwendet.

<sup>2</sup> Umgangssprachlich wird der Begriff „naturnah“ auch für kulturbetonte oder strukturierte Gerinne (siehe Kapitel 2.1.2) verwendet.

Bereich der Pegelstellen ein  $k_{St}$ -Wert errechnet. Die Ergebnisse wurden miteinander verglichen und somit die Rauheitsbeiwerte in höherer Genauigkeit bestimmt (siehe Kapitel 4).

Um ein breiteres Spektrum von Fließquerschnitten unterschiedlichen Bewuchses abdecken zu können, wurden zwei breitere und stärker bewachsene Querschnitte den Untersuchungen hinzugefügt. Das Sohlgefälle wurde bei diesen Querschnitten nicht vermessen und es wurden auch keine Fließgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt.

Wegen des Fehlens exakter Geschwindigkeitsmessungen bei größeren Durchflüssen ist die Ermittlung der Strickler-Beiwerte bei diesen mit einigen Ungenauigkeiten bzw. Annahmen verbunden. Für eine genauere Bestimmung von Rauheitsbeiwerten müssten neben einer Neuaufnahme des Querschnittes (am besten sogar mehrerer Querschnitte im Nahbereich des Pegels) auf jeden Fall Fließgeschwindigkeitsmessungen zur Verifizierung des Pegelschlüssels durchgeführt werden. Alle Querschnittsabmessungen wurden der Homepage des Wasserportals Burgenland (siehe [WASSERPORTAL BGLD. 2014]) entnommen.

Weiters wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass aufgrund der Abschätzung einer äquivalenten Sandrauheit für die Sohle (um  $k_{St}$ -Werte für die Böschung angeben zu können) die gewählten von den tatsächlichen Werten abweichen können. Für eine genauere Bestimmung müssten detailliertere Untersuchungen der Sohlrauheit (siehe Verfahren lt. [DVWK, 1990], S. 5 ff.) durchgeführt werden.

Zuletzt ist noch zu sagen, dass anstelle des eigentlich für die Berechnung notwendigen Energieliniengefälles das vermessene Sohlgefälle herangezogen wurde. Dieser Umstand wurde jedoch ignoriert, da in der Planungsphase von Projekten im Flussbau ebenfalls nur das Sohlgefälle und nicht das Energieliniengefälle bekannt ist. Es sei denn es werden umfangreiche Wasserspiegelberechnungen mit Empfindlichkeitsuntersuchungen durchgeführt.

## 2 Hydraulische Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die für die Berechnung notwendigen hydraulischen Grundlagen eingegangen. Außerdem werden relevante, getroffene Annahmen und Vereinfachungen erklärt.

### 2.1 Definitionen

Im Folgenden werden wichtige hydraulische Grundbegriffe erläutert.

#### 2.1.1 Gerinneströmungen

Der wichtigste Fall von **Gerinneströmungen** sind Wasserströmungen mit freier Oberfläche wie in Flüssen oder Kanälen.

Die Definition von **Flussprofilen** erfolgt nach Abbildung 2.1 (diese verwendeten Größen werden auch für weitere Berechnungen verwendet). In diesem Zusammenhang wird der Begriff des hydraulischen Radius  $R_{Hy}$  [m] erklärt. Er ergibt sich zu:

$$R_{Hy} = \frac{A}{U} \quad (2-1)$$

In Gleichung (2-1) ist  $A$  [m<sup>2</sup>] die (durchflossene) Querschnittsfläche und  $U$  [m] der benetzte Umfang. In weiterer Folge wurde untersucht, ob bzw. wann eine Vernachlässigung von  $R_{Hy}$  und ein Heranziehen der mittleren Wassertiefe  $\bar{h}$  (bzw. als Wassertiefe WT bezeichnet in den schematischen Darstellungen der Querprofile) erlaubt ist (siehe Kapitel 4).

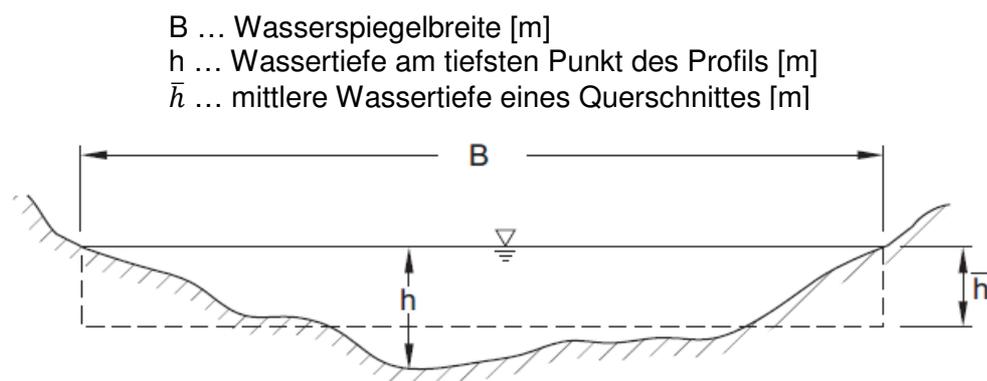


Abbildung 2.1: Querschnitt eines Flussprofils (entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 4)

### 2.1.2 „Natürlichkeit“ von Gerinnequerschnitten

Der ökologische Wert eines Lebensraumes wird wesentlich durch die Nähe zum natürlichen Arteninventar bestimmt. Dem Grad der „Natürlichkeit“ wird von ELLENBERG, am Beispiel der Vegetation, eine 8-stufige Skala zugeordnet (siehe Tabelle 2.1; nach [PAUGAM, 2008], S. 20).

Tabelle 2.1: 8-stufige Skala nach ELLENBERG für die Bewertung des Vegetationszustandes eines Lebensraumes (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 20, geringfügig verändert)

Naturbetonte Formen	Kulturbetonte Formen
1. unberührt	5. bedingt naturfern
2. natürlich	6. naturfern
3. naturnah	7. naturfremd
4. bedingt naturnah	8. künstlich

Die Graduierung zwischen „naturbetonten“ und „kulturbetonten“ Vegetationsformen ist eine Folge der anthropogenen Nutzung der Landwirtschaft. Die untersuchten Gerinne liegen dabei im Bereich von „naturnah“ (Tauchenbach in Altschlaining oder Raab bei Neumarkt) bis „naturfremd“ bzw. „künstlich“ (Zickenbach in Siget in der Wart).

### 2.1.3 Begriffe zur Quantifizierung von Oberflächenbeschaffenheiten

Nach [LfU 3, 2002], S. 16 definiert sich der Begriff „**Rauheit**“ (oder „**Rauigkeit**“) durch die Oberflächenbeschaffenheit einer Wand, Böschung oder Sohle als Erscheinungsform. In der Hydraulik dient er zur parametrischen Quantifizierung von Oberflächenbeschaffenheiten.

Als „**absolute Rauheit**“ bezeichnet man die Abweichung der Oberflächenkontur von einem ebenen, geradlinigen Nullniveau, senkrecht zu diesem gemessen. Die absolute Rauheit ist eine in Fließgewässern natürlich entstandene, geometrische Größe, sagt also nichts über das hydraulische Widerstandsverhalten aus.

Die „**relative Rauheit**“ ist ein Verhältniswert, der die Auswirkungen von absoluter Rauheit auf eine Strömung beschreibt ( $=k/D$  bei Rohrströmungen bzw.  $k/(4 \cdot R_{Hy})$  bei Gerinneströmungen – siehe Abbildung 2.6).

Die „**Sandrauheit**“ ist jenes Rauheitsmaß, das durch gleich große kugelförmige Sandkörner entsteht, die auf eine Wand in dichtest möglicher Lagerung aufgebracht sind.

Technische und natürliche Rauheiten werden durch die „**äquivalente Sandrauheit**“ ausgedrückt. Sie ist jene Rauheit, die denselben Fließwiderstand (bei hydraulisch voll rauen Fließverhältnissen) hat, wie die tatsächlich vorhandene Wand- bzw. Sohlrauheit (nach [LEHMANN, 2005], S. 77).

## 2.2 Hydrodynamische Grundlagen

Die Anwendung physikalischer Gesetze (wie z.B. das Massenerhaltungsgesetz, das Gesetz der Energieerhaltung sowie das 2. Bewegungsgesetz von Newton) hat es ermöglicht, die drei wichtigsten **Erhaltungsgesetze der Hydrodynamik** herzuleiten (nach [OUMERACI, 2014], S. 77):

- die Kontinuitätsgleichung<sup>3</sup> (siehe Gleichung (2-2))
- die Bernoulli-Gleichung
- den Impuls- bzw. Stützkraftansatz (aus diesem resultieren auch die beschriebenen Fließformeln)

$$Q = v_m * A \quad (2-2)$$

$Q$  [m<sup>3</sup>/s] bezeichnet den Durchfluss und ist konstant für stationäre und inkompressible Strömungen (näherungsweise bei weiteren, praktischen Betrachtungen erfüllt).  $v_m$  [m/s] ist die mittlere Geschwindigkeit und  $A$  [m<sup>2</sup>] die Querschnittsfläche.

Bei allen nachfolgenden Berechnungen herrscht jeweils ein **turbulenter Fließzustand** vor. Dabei kommt es zu einer Überlagerung der Hauptströmung durch zusätzlich normal dazu orientierte Geschwindigkeitskomponenten und zu Wirbelbewegungen. Es stellt sich eine turbulente Geschwindigkeitsverteilung ein (siehe Abbildung 2.2, rechtes Bild). Aus diesem Grund sind auch näherungsweise die durchgeführten Geschwindigkeitsmessungen mit einem Schwimmkörper an der Wasseroberfläche zulässig ( $v_m = v_{Oberfläche}$ ).

Im unmittelbaren Nahbereich der Sohle und der Böschungen wird bei den durchgeführten **Geschwindigkeitsmessungen** aufgrund größerer Sohlunebenheiten ein Bereich mit einer Geschwindigkeit von 0 m/s definiert (bei der Sohle im Bereich von  $k_{S, Sohle}/4$  – z.B. 2,5 cm bei der Pinka in Pinkafeld und bei der Böschung im Bereich von

---

<sup>3</sup> Leonardo da Vinci (1452–1519) hat als erster das Kontinuitätsprinzip beschrieben. Die mathematische Formulierung als Kontinuitätsgleichung konnte jedoch erst fast ein Jahrhundert später durch seinen Landsmann CASTELLI (1577–1644), Schüler von GALILEI (1564–1642) erbracht werden (zit. in [OUMERACI, 2014], S. 84).

$k_{S, \text{Sohle}}/2$  – z.B. 5 cm bei der Pinka in Pinkafeld), um eine Überschätzung der mittleren Geschwindigkeit und somit eine Überschätzung des Durchflusses zu vermeiden.

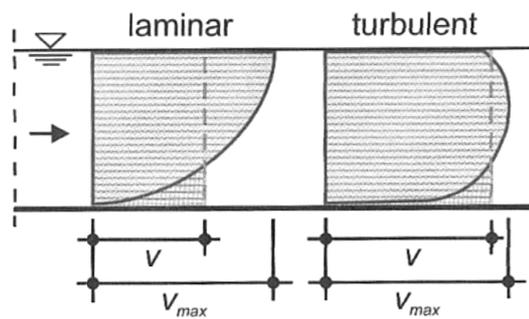


Abbildung 2.2: Geschwindigkeitsverteilungen von Gerinneströmungen (entnommen aus [FREIMANN, 2014], S 40)

Charakterisiert wird der **Fließzustand** durch die **Reynoldszahl  $Re$**  (für offene Gerinne wird  $4 * R_{Hy}$  anstelle des Rohrdurchmessers  $d$  verwendet):

$$Re = \frac{v_m * 4 * R_{Hy}}{\nu} \quad (2-3)$$

In Gleichung (2-3) ist  $v_m$  die mittlere Geschwindigkeit über den Fließquerschnitt in m/s,  $\nu$  die kinematische Viskosität in  $m^2/s$  und  $R_{Hy}$  der hydraulische Radius in m. Ist die Reynoldszahl  $\leq 2320$  (in etwa), dann liegt laminare-, ansonsten turbulente Gerinneströmung vor (in der Mehrzahl der praktischen Anwendungen liegen turbulente Strömungsverhältnisse vor, vgl. [JIRKA, 2009], S. 7 ff).

Kurz sei noch erwähnt, dass bei den nachfolgenden Berechnungen jeweils ein Wert von  $\nu = 1,21 * 10^{-6} m^2/s$  für die **kinematische Viskosität** angesetzt wurde (bei einer Wassertemperatur von ca. 13 °C im Herbst 2014). Bei einer Berücksichtigung der Zähigkeitseinflüsse und einer Veränderung auf  $\nu = 1,62 * 10^{-6} m^2/s$  bei 3 °C im Winter kann so gut wie kein Unterschied beim resultierenden  $k_{St}$ -Wert ausgemacht werden (Abweichung  $< 0,01 \%$ ). Aus diesem Grund wird der Wert  $\nu$  als konstant mit  $1,21 * 10^{-6} m^2/s$  angenommen.

Weiters kann bei allen Berechnungen **strömender oder unterkritischer Abfluss** festgestellt werden (Störeffekte machen sich sowohl stromauf-, als auch stromabwärts bemerkbar, nach [BOLLRICH, 2013], S. 268 f., siehe Abbildung 2.3).

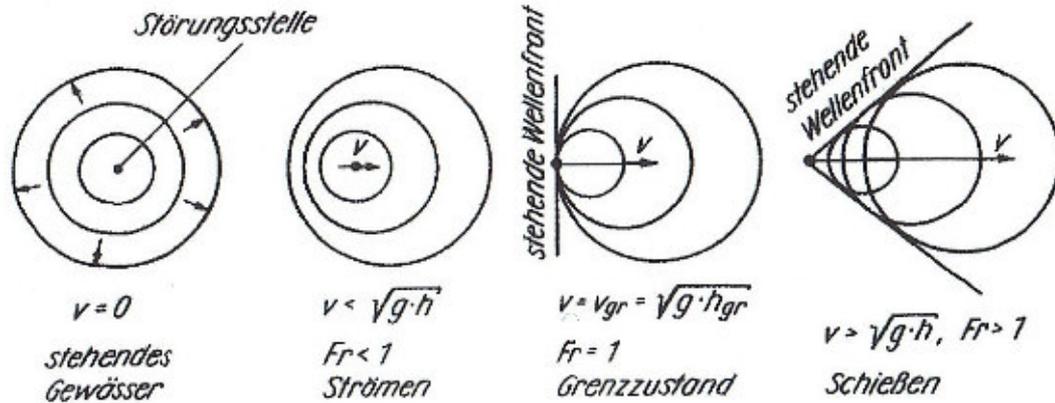


Abbildung 2.3: Formen der Ausbreitung von Oberflächenwellen in offenen Gerinnen bei unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit (entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S 268)

Dabei spielt die **Froudezahl** eine entscheidende Rolle (siehe Gleichung (2-4)):

$$Fr = \frac{v_m}{\sqrt{g \cdot \bar{h}}} \quad (2-4)$$

Die Froudezahl gibt das Verhältnis zwischen Fließgeschwindigkeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen an.  $v_m$  bezeichnet die mittlere Geschwindigkeit [m/s] über den Fließquerschnitt,  $g$  die Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>] und  $\bar{h}$  die mittlere Wassertiefe [m] nach Abbildung 2.1. Ist die Froudezahl  $< 1$ , dann existiert strömender, ansonsten schießender oder überkritischer Abfluss. Abbildung 2.4 zeigt den Verlauf der Energiehöhe bei unterschiedlichen Wassertiefen. Im Übergangsbereich von Strömen zu Schießen stellt sich ein Energieminimum  $h_{E,min}$  ein ( $h_E = h + \frac{v^2}{2 \cdot g}$ ).

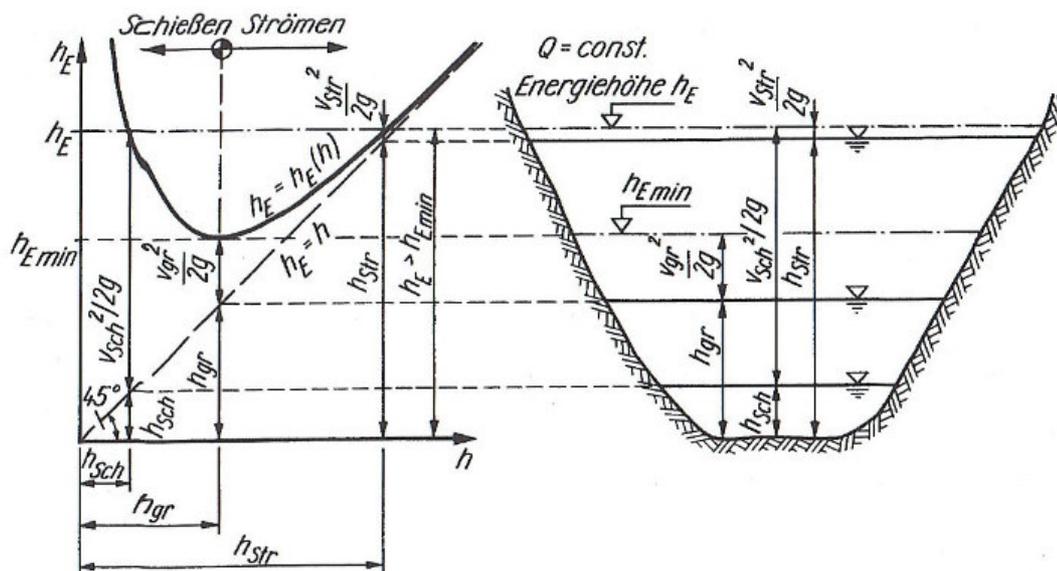


Abbildung 2.4: Verlauf der Energiehöhe (entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S 268)

### 2.3 Voraussetzungen für die Verwendung von Fließformeln

Die im Kapitel 4 verwendeten Fließformeln (universelles Fließgesetz nach DARCY-WEISBACH mit der Ermittlung des Widerstandsbeiwertes nach COLEBROOK und WHITE bzw. Fließformel nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER) basieren auf grundlegenden Annahmen und Voraussetzungen (nach [JIRKA, 2009], S. 5 ff., [UNSER, 2005], S. 67 f., [FREIMANN, 2014], S. 37 ff. und [VENTE CHOW, 1959], S. 89 ff.):

- Annahme einer **idealen Flüssigkeit** (Voraussetzung für alle Phänomene der Hydrodynamik):
  - inkompressibel (das Volumen ändert sich bei Variation des Druckes nicht) – Voraussetzung für die Kontinuitätsgleichung u.a.
  - reibungsfrei (keine Scherkräfte werden zwischen den Flüssigkeitsteilchen übertragen)
- In Bezug auf die räumliche Variation: die **Gerinneströmung** muss **gleichförmig** sein. Strömungscharakteristiken wie Wassertiefe, Geschwindigkeit und deren Verteilung ändern sich in Strömungsrichtung nicht (dies kann näherungsweise für die Betrachtung eines nur sehr kurzen Gewässerabschnittes – z.B. im Nahbereich einer Pegelstelle – angenommen werden). Daraus resultiert die Vereinfachung, dass das Sohlgefälle  $I_S$  gleich dem Wasserspiegelgefälle  $I_W$  gleich dem Energieliniengefälle  $I_E$  ist ( $I_S = I_W = I_E$ ) ist.
- Der **Fließvorgang** muss **stationär** sein, d.h. die Fließgeschwindigkeit an einem betrachteten Punkt ist unabhängig von der Zeit (auch dies ist für die weiteren Berechnungen erfüllt – z.B. werden für Pegelstellen zeitgleich und in Abhängigkeit voneinander Wasserstände und Durchflüsse aufgezeichnet. Außerdem werden Wasserstände und Durchflüsse jeweils nur für einen Zeitpunkt, nicht jedoch über eine Zeitspanne betrachtet).

### 2.4 Fließformeln für allgemeine Gerinne

Mithilfe der Kontinuitätsgleichung (siehe Gleichung (2-2)) besteht ein Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließgeschwindigkeit in einem offenen Gerinne. Bereits ab dem 18. Jahrhundert wurde auch begonnen, eine Beziehung zwischen dem Durchfluss (bzw. der Fließgeschwindigkeit) und der Gerinnequerschnittsform und der Rauheitscharakteristik herzustellen (nach [JIRKA, 2009], S. 19).

Unter Voraussetzung einer stationären und gleichförmigen Strömung kann durch Gleichsetzen der Hangabtriebskomponente (siehe Gleichung (2-5)) mit der Reibungskraft (siehe Gleichung (2-6)) die Fließformel nach CHEZY (siehe Gleichung (2-8)) hergeleitet werden.

Weiters wird vorausgesetzt, dass  $\alpha$  hinreichend klein ist und somit  $I_E = \sin(\alpha) \sim \tan(\alpha)$  gesetzt werden kann. Die Wandschubspannung ist bei turbulenter Fließbewegung (und nur solche kommt bei Gerinnen praktisch vor) proportional dem Geschwindigkeitsquadrat,  $\tau_0 \sim v^2$  (nach [BOLLRICH, 2013], S. 240 f.).

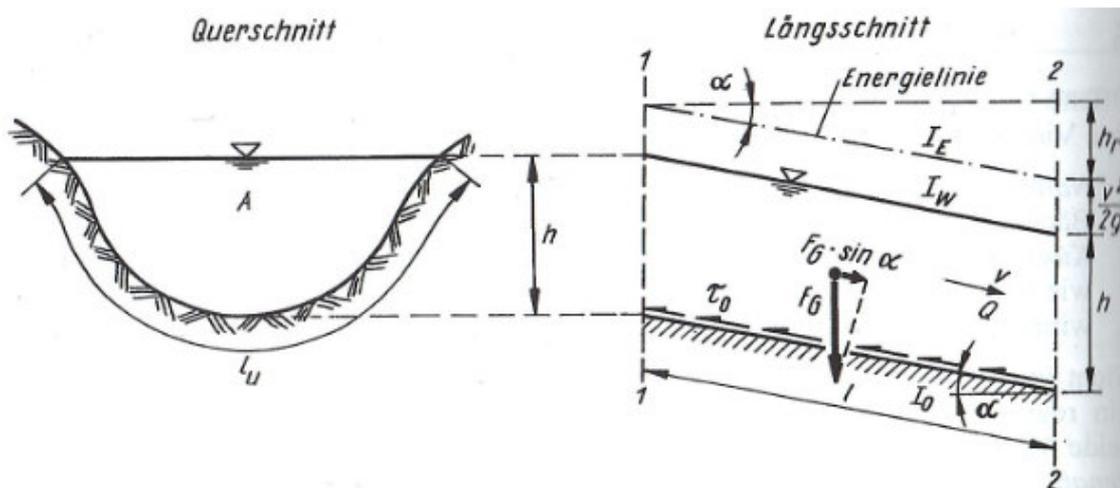


Abbildung 2.5: Querschnitt und Längsschnitt eines offenen Gerinnes – zur Ableitung der Fließformel (entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S. 240)

$$F_G \cdot \sin(\alpha) = A \cdot \rho \cdot g \cdot h_r \quad (2-5)$$

$$F_R = \tau_0 \cdot l_u \cdot l = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot l_u \cdot l \quad (2-6)$$

$h_r$  [m] ist die Reibungsverlusthöhe,  $l_u$  [m] der benetzte Gerinneumfang und  $l$  [m] die Länge des betrachteten Gerinneabschnittes. Die **allgemeine Form der Fließformel** lautet:

$$v_m = C \cdot R_{Hy}^x \cdot I^y \quad (2-7)$$

Nach Gleichung (2-7) ist  $v_m$  [m/s] die mittlere Fließgeschwindigkeit,  $R_{Hy}$  [m] der hydraulische Radius und  $I$  bezeichnet das Energieliniengefälle.  $x$  und  $y$  sind Exponenten; und  $C$  steht als Faktor für den Fließwiderstand. Dieser ist im Wesentlichen von der mittleren Fließgeschwindigkeit, vom hydraulischen Radius, der Rauheit des Gerinnes, der Viskosität abhängig.

Historisch wesentlich ist die **Fließformel nach CHEZY** (1769):

$$v_m = C * R_{Hy}^{\frac{1}{2}} * I_0^{\frac{1}{2}} \quad (2-8)$$

Im Folgenden werden zwei, im Wasserbau gebräuchliche Fließformeln vorgestellt, die als Erweiterung der CHEZY-Formel angesehen werden können. Sowohl die Fließformel nach DARCY-WEISBACH, als auch jene nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER werden in dieser Arbeit herangezogen.

#### 2.4.1 Fließformel nach DARCY-WEISBACH

Diese Fließformel wurde von Henry DARCY und Julius WEISBACH im 19. Jahrhundert entwickelt. Ursprünglich in der Rohrhydraulik verwendet und physikalisch begründet, ist dieser Ansatz mit dem Konzept des hydraulischen Radius  $R_{Hy}$  auch für andere Querschnitte approximativ anwendbar. Sie lautet:

$$v_m = \left( \frac{8 * g}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} * R_{Hy}^{\frac{1}{2}} * I_0^{\frac{1}{2}} \quad (2-9)$$

Der **Widerstandsbeiwert**  $\lambda$  ist abhängig von der Reynoldszahl (viskose Einflüsse) und der Gerinnerauheit. Nach dem allgemeinen Ansatz (nach COLEBROOK und WHITE) kann  $\lambda$  iterativ folgendermaßen bestimmt werden:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -C_1 * \log \left( \frac{C_3}{4 * Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{k_S}{C_2 * R_{Hy}} \right) \quad (2-10)$$

$k_S$  [mm] ist in Gleichung (2-10) die äquivalente Sandrauheit. Typische  $k_S$ -Werte für Sohle, Böschungen und Vorlandbereiche sind in Tabelle 2.2 dargestellt (weitere Werte und umfangreiche Tabellen sind im Kapitel 3 aufgelistet).

$C_1, C_2$  und  $C_3$  sind Formbeiwerte für die Gerinnegeometrie. Tabelle 2.3 zeigt, wie diese anhand diverser Versuche von Autoren für unterschiedliche Querschnittsformen bestimmt wurden.

Tabelle 2.2: Typische äquivalente Sandrauheiten  $k_s$  [mm] (entnommen aus [LfU 3, 2002], S. 17 f., verändert)

Einzelrauheiten	Literatur, Jahr	$k_s$ [mm]
<b>Gerinnerauheiten</b>		
Mauerwerk aus Bruchstein	[SCHNEIDER, 1994]	15-40
Felswände, gute Bearbeitung	[SCHNEIDER, 1994]	7,5-75
Raue Natursteinmauer	[SCHNEIDER, 1994]	80-100
	[DVWK, 1991]	
Steinschüttung	[SCHNEIDER, 1994]	200-300
	[DVWK, 1991]	
	[BOLLRICH, 1996]	100-150
	[SCHRÖDER, R. C., 1966]	bis 500
Sand oder Kies	[SCHNEIDER, 1994]	$d_{90}$ (Korn)
	[DVWK, 1991]	
Grobkies	[SCHNEIDER, 1994]	60-200
	[DVWK, 1991]	
	[SCHRÖDER, R. C., 1966]	
Flusskies, Geröll	[BOLLRICH, 1996]	50-100
<b>Vorländer und Böschungen</b>		
Ackerboden	[SCHNEIDER, 1994] [DVWK, 1991]	20-250
Acker mit Kulturen	[SCHNEIDER, 1994] [DVWK, 1991]	250-800
Waldboden	[SCHNEIDER, 1994] [DVWK, 1991]	160-320
Gras	[DVWK, 1991]	100-350
Gras und Stauden	[DVWK, 1991]	130-400
Steinpackung	[BOLLRICH, 1996]	150-200
Steinschüttung 80/450 mit Gras überwachsen	[DVWK, 1991]	300

Tabelle 2.3: Zusammenstellung ermittelter Formbeiwerte verschiedener Autoren (entnommen aus [HABERSACK, 2007], S. 7)

Gerinnegeometrie	Autor	$C_1$	$C_2$	$C_3$
Druckrohr	COLEBROOK und WHITE (1939)	2,0	14,83	2,52
Breites Gerinne	Keulegan (1938)	2,03	11,09	3,41
	Rouse (1946)	2,03	10,95	1,70
	Thijssse (1949)	2,03	12,20	3,033
	Henderson (1966)	2,0	12,0	2,5
		2,0	12,4	3,4
Rechteckgerinne (Breite/Tiefe = 4)	Reinius (1961)	2,0	14,4	2,9
Rechteckgerinne		2,0	14,8	2,8

Bei einem Blick auf Tabelle 2.3 wird ersichtlich, wie sehr die einst durch Versuche ermittelten Formbeiwerte für vom Kreis abweichende Querschnitte variieren.

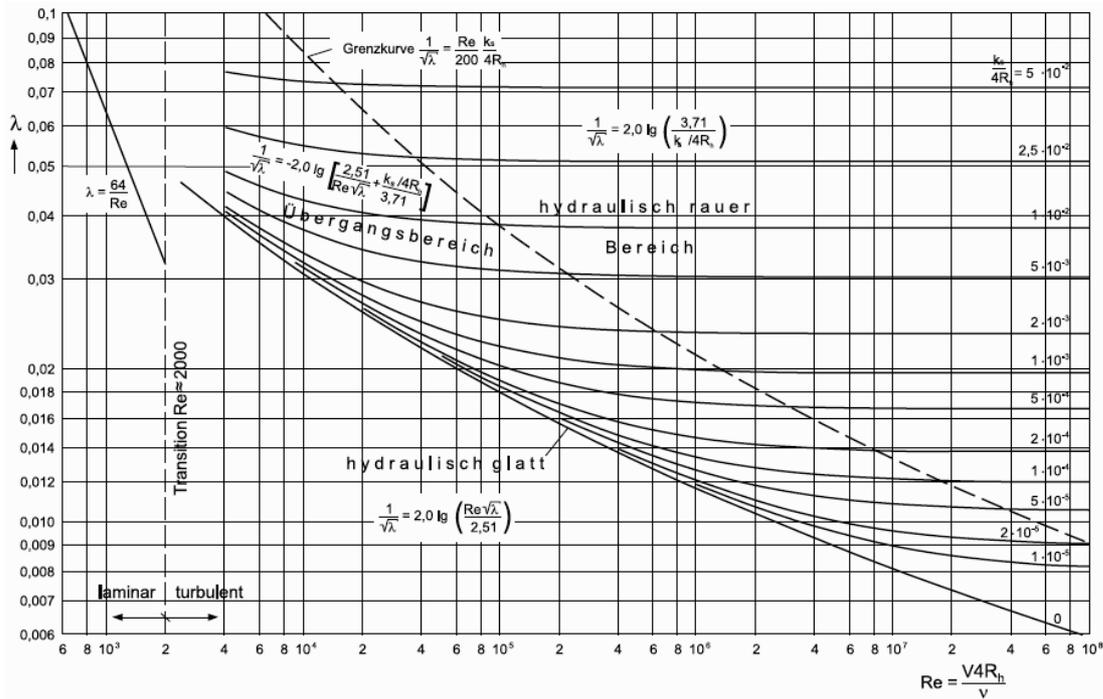


Abbildung 2.6: Moody-Diagramm für Gerinneströmungen: Reibungsbeiwert  $\lambda$  als Funktion der Reynoldszahl  $Re$  und der relativen Rauheit  $k_s/(4 * R_{Hy})$  (entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 21)

Abbildung 2.6 stellt das **Moody-Diagramm** für Gerinneströmungen dar. In Abhängigkeit von Reynoldszahl und relativer Rauheit kann der Reibungsbeiwert abgelesen oder mittels der angegebenen Formeln ermittelt werden. Die untersuchten Querschnitt-

te liegen im **hydraulisch rauhen Bereich** (die Oberflächenrauheiten sind größer als die Grenzschichtdicke, siehe Abbildung 2.7, rechtes Bild).

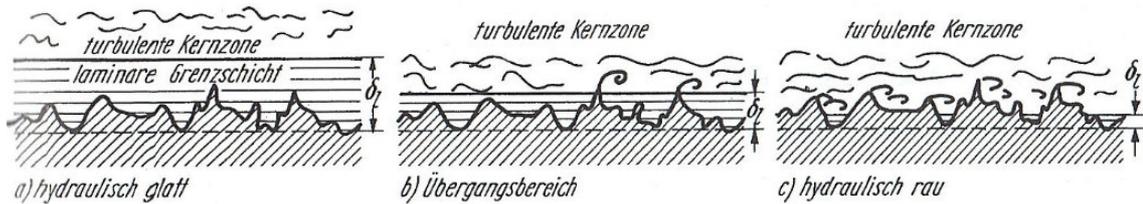


Abbildung 2.7: Formen des hydraulischen Verhaltens: hydraulisch rauher Zustand (entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S. 175)

Die Formel zur (iterativen) **Berechnung von  $\lambda$**  nach dem universellen Ansatz von COLEBROOK und WHITE, nach [DVWK, 1990] und [DVWK, 1991] (zit. in [PAUGAM, 2008], S. 14) lautet:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,035 * \log \left( \frac{\nu}{4,51 * f * \sqrt{g * R_{Hy} * I_E}} + \frac{k_S}{14,84 * f * R_{Hy}} \right) \quad (2-11)$$

Nach [HEINEMANN/PAUL, 1998], S. 126, kann  $\lambda$  folgendermaßen bestimmt werden (Gleichung (2-12), diese Darstellung ist äquivalent mit obiger Formel):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,035 * \log \left( \frac{2,52}{f * Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{k_S}{3,71 * f * d_{Hy}} \right) \quad (2-12)$$

Alle im Weiteren untersuchten, offenen Gerinne liegen im hydraulisch rauhen Bereich. Aus diesem Grund könnte der erste Term (Einfluss der Zähigkeit) von Gleichung (2-11) vernachlässigt werden (siehe Gleichung (2-13)). Bei weiteren Berechnungen wird die Zähigkeit jedoch nicht vernachlässigt (obwohl der Einfluss bei Vernachlässigung des Terms der Zähigkeit auf den  $k_{St}$ -Wert eines beliebigen Gerinnequerschnitts weniger als 1 % beträgt).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,035 * \log \left( \frac{k_S}{14,84 * f * R_{Hy}} \right) \quad (2-13)$$

In Gleichung (2-11), (2-12) und (2-13) ist  $f$  ein Faktor zur Berücksichtigung der Querschnittsgeometrie. Unzählige Untersuchungen zum Thema **Formbeiwert** wurden in der Vergangenheit durchgeführt (siehe Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9):

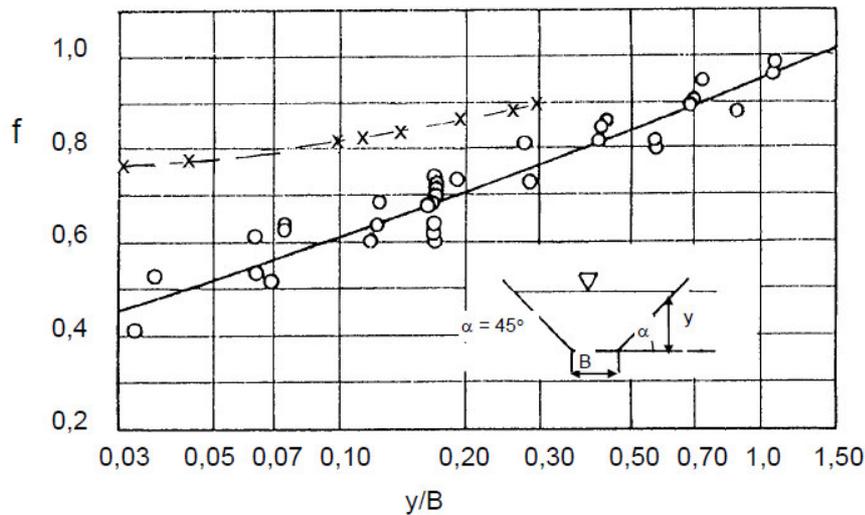


Abbildung 2.8: Formbeiwert  $f$  als Funktion des Verhältnisses von Wassertiefe  $y$  zu Sohlenbreite  $B$  für Trapezgerinne (nach [BOCK, 1966] und [HEY, 1979]; entnommen aus [LfU 2, 2002], S. 51)

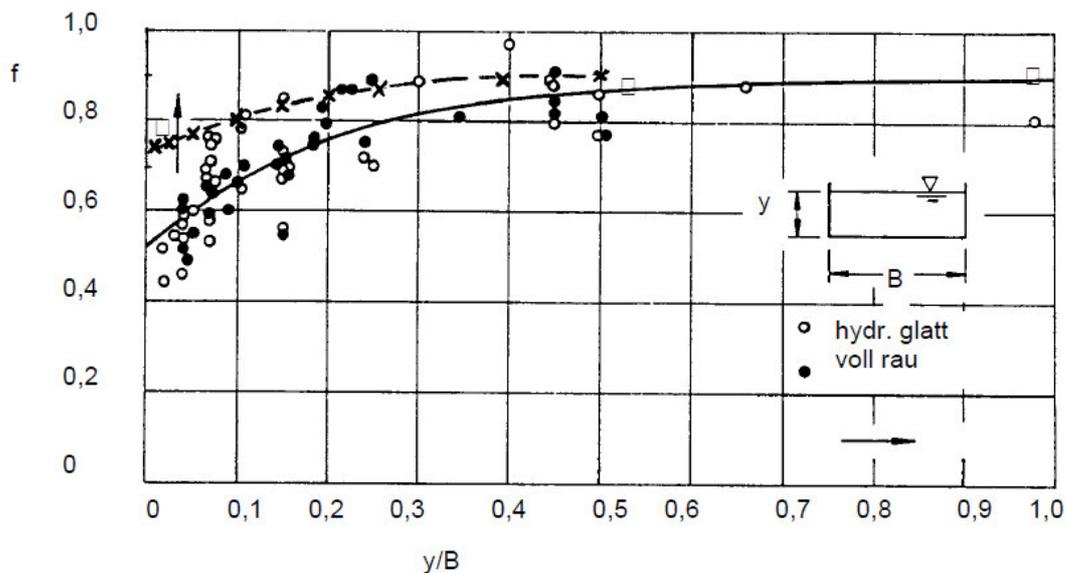


Abbildung 2.9: Formbeiwert  $f$  als Funktion des Verhältnisses von Wassertiefe  $y$  und Sohlenbreite  $B$  für Rechteckgerinne (nach [SÖHNGEN, 1987] sowie [HEY, 1979], mit  $x$  markiert und [AIGNER, 1994], mit  $\square$  markiert – entnommen aus [LfU 2, 2002], S. 52)

Nach [SCHRÖDER, R. C. 1994] (zit. in [HEINEMANN/PAUL, 1998], S. 126) wird der Formbeiwert folgendermaßen definiert (siehe Gleichung (2-14)):

$$f = 0,90 - 0,38 * e^{\frac{-5*A}{B^2}} \quad (2-14)$$

$A$  [m<sup>2</sup>] ist die durchflossene (und durchflusswirksame) Querschnittsfläche,  $B$  [m] die Gewässerbreite an der Wasseroberfläche (siehe Abbildung 2.1).

Größeren Einfluss hat der Formbeiwert  $f$  bei breiten Gerinnen bzw. einer niedrigen mittleren Wassertiefe. Nach eigenen Berechnungen kann der Einfluss des Formbeiwertes folgendermaßen beschrieben werden:

- wird  $f$  vernachlässigt (also  $f = 1$  angenommen, entspricht einem Kreisquerschnitt), so ergeben sich geringe Differenzen bei der Ermittlung des  $k_{St}$ -Wertes im Vergleich zur GAUCKLER-MANNING-STRICKLER-Formel ( $k_{St}$ -Wert DW ca. 0 - 5 % niedriger als  $k_{St}$ -Wert GMS)
- wird  $f$  nach Gleichung (2-14) berechnet, so ergeben sich etwas größere Differenzen bei der Ermittlung des  $k_{St}$ -Wertes im Vergleich zur GMS-Formel ( $k_{St}$ -Wert DW ca. 0 – 10 % höher als  $k_{St}$ -Wert GMS)

Weil der Einfluss des Formbeiwertes somit gering und normalerweise für praktische Aufgabenstellungen vernachlässigt werden kann (u.a. auch deshalb, weil die Abweichungen aufgrund der streuenden Annahmen der Rauheiten wesentlich größer ist; (nach [SCHRÖDER, W., 1999], S 163) bzw. der Beiwert für unregelmäßige, naturnahe Querschnitte nicht wirklich bekannt ist (nach [HEINEMANN/PAUL, 1998], S. 126) wird  $f$  in der Praxis oft vernachlässigt. Bei den folgenden Rückrechnungen von Rauheitsbeiwerten wird der Formbeiwert jedoch nicht ignoriert.

In Anlehnung an die Empfehlung von [MERTENS, 1996] (zit. in [LfU 2, 2002], S. 50-53) wird der Formbeiwert  $f$  für alle weiteren Berechnungen folgendermaßen definiert:

- $f = 0,74$  für breite Rechteck- und Trapezgerinne ( $B/y \geq 25$ )
- $f = 0,83$  für kompakte Rechteck- und Trapezgerinne ( $B/y < 25$ )

Nach eigenen Erfahrungen ergibt sich bei der Berechnung des  $k_{St}$ -Wertes mit der DW-Gleichung ein um weniger als 10 % höherer Wert als bei der Berechnung eines  $k_{St}$ -Wertes mit der GMS-Gleichung.

#### 2.4.2 Fließformel nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER

Die zweite, in dieser Arbeit angewandte Fließformel ist die empirische Formel für die Gerinnebemessung nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER. Im Gegensatz zur DARCY-WEISBACH – Formel wird als Exponent von  $R_{Hy}$   $\frac{2}{3}$  verwendet. Weiters wird ein sogenannter Strickler-Beiwert ( $k_{St}$ -Wert) mit der Dimension  $m^{\frac{1}{3}}/s$  eingeführt (dieser wurde durch viele Studien und Feldmessungen untersucht). Die GMS-Formel (siehe

Gleichung (2-15)) hat den Nachteil, dass sie dimensionsanalytisch nicht homogen ist (nach [JIRKA, 2009], S. 23). Die Formel lautet:

$$v_m = k_{St} * R_{Hy}^{\frac{2}{3}} * I_0^{\frac{1}{2}} \quad (2-15)$$

Zudem sei noch erwähnt, dass die Formel in der angelsächsischen Literatur oft in der Form

$$v_m = \frac{1}{n} * R_{Hy}^{\frac{2}{3}} * I_0^{\frac{1}{2}} \quad (2-16)$$

angegeben wird. In Gleichung (2-16) wird der Beiwert  $n = \frac{1}{k_{St}}$  „Manning's n“ genannt.

Für den  $k_{St}$ -Wert von offenen, naturnahen Gerinnen existieren eine ganze Bandbreite von Werten (je nach Verkräutungszustand bzw. Unregelmäßigkeit der Sohle und der Querschnittsform). Fotografische Darstellungen sind bei der Wahl eines richtigen  $k_{St}$ -Wertes hilfreich (siehe umfangreiche Auflistung und Fotos im Kapitel 3). Eine kompakte Zusammenstellung liefert Tabelle 2.4.

Tabelle 2.4: Zusammenstellung von  $k_{St}$ -Werten für offene Gerinne und Vorlandbereiche (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 21 bzw. [LfU 3, 2002], S. 12, verändert)

Gerinnecharakteristik	$k_{St}$ -Wert [m <sup>1/3</sup> /s]	Literaturquelle
<b>Natürliche Flüsse</b>		
Natürliche Flussbetten mit fester Sohle, ohne Unregelmäßigkeiten	40	[ZUPPKE, 1992] [LANGE, 1993] [NAUDASCHER, 1992] [SCHRÖDER, W., 1994]
	40 – 42	[RÖSSERT, 1994]
Natürliche Flussbetten mit Geröll und Unregelmäßigkeiten	28 – 30	[ZUPPKE, 1992]
	30	[RÖSSERT, 1994] [BOLLRICH, 1996] [LANGE, 1993] [NAUDASCHER, 1992] [SCHRÖDER, W., 1994]
Natürliche Flussbetten mit mäßigem Geschiebetrieb	33 – 35	[ZUPPKE, 1992] [SCHRÖDER, W., 1994]
	35 – 38	[RÖSSERT, 1994]

Natürliche Flussbetten mit starker Geschiebeführung	30	[BOLLRICH, 1996]
	28	[LANGE, 1993] [NAUDASCHER, 1992] [SCHRÖDER, W., 1994]
Natürliche Flussbetten, Ufer verkrautet	30 – 35	[SCHRÖDER, W., 1994]
Natürliche Flussbetten, verkrautet	30 – 35	[LANGE, 1993] [NAUDASCHER, 1992]
(kleinere) natürliche Flüsse mit HW-Abflussbreiten < 30 m gleichmäßig gewunden, einige Mulden und Untiefen mit Stillwasserbereichen, verkrautet, tiefe Mulden sehr verkrautete Bereiche, tiefe Mulden oder Vorländer mit dichtem Baumbestand und Unterholz	22 – 30	[VEN TE CHOW, 1959]
	13 – 20	
	ca. 10	
<b>Vorlandbereiche, Böschungen</b>		
Flussvorland mit Vegetation	30	[BOLLRICH, 1996]
unebenes, bewachsenes Vorland	15 – 25	[SCHRÖDER, W., 1994]
Vorland, je nach Bewuchs	20 – 25	[RÖSSERT, 1994]

## 2.5 Vor- und Nachteile der verwendeten Fließformeln

In diesem Absatz werden die wesentlichen Merkmale beider Fließformeln, sowie Vor- und Nachteile und ein Zusammenhang zwischen der DW- und der GMS-Formel vorgestellt.

Ein **Vorteil** der Anwendung der **GMS-Formel** gegenüber der DW-Formel ist die einfache rechnerische Handhabung (und der soliden Datengrundlage, v.a. im turbulenten, hydraulisch rauen Bereich). Dem gegenüber stehen folgende **Nachteile** (nach [HEINEMANN/PAUL, 1998], S. 129 und [FÄH, 1995], S. 121):

- Bei etwa gleichbleibender Rauheit des Fließquerschnitts wächst der  $k_{St}$ -Wert mit zunehmender Wassertiefe geringfügig an. Somit kann ein bei niedriger oder mittlerer Wassertiefe ermittelter Wert nur bedingt auf höhere Wasserspiegel übertragen werden.

- Großbewuchs oder sonstige Einzelwiderstände können mit der GMS-Formel nur schwer berücksichtigt oder abgeschätzt werden. Bei der DW-Formel können diese einfach als zusätzlicher Term zum Gesamtwiderstand addiert werden. Außerdem finden bei der klassischen GMS-Formel eine unterschiedliche Rauheit und Gliederung des Gerinnequerschnitts, sowie ein Einfluss von Sedimenttransport und veränderlicher Sohlenformen bei bewegter Sohle keine Berücksichtigung.
- Im Strickler-Beiwert ist eine Summe von Einzelwiderständen enthalten (er ist somit ein Summenparameter). Bei stark strukturierten Fließgewässern ergibt sich die Schwierigkeit, den  $k_{St}$ -Wert richtig einzuschätzen.
- Der Strickler-Beiwert geht linear in die Fließgeschwindigkeit und somit auch den Abfluss ein, somit ist eine genaue Schätzung essenziell.
- Die Genauigkeit der GMS-Formel hängt unter anderem auch von der relativen Rauheit ab. Nach [JIRKA, 2009], S. 117 f., stellt die Fließformel nach GMS im Bereiches von  $0,001 < \frac{k_S}{4 \cdot R_{Hy}} < 0,1$  mit Abweichungen  $< 10\%$  eine gute Annäherung an die DW-Gleichung dar (siehe Abbildung 2.10). Bei vorliegenden Rückrechnungen des  $k_{St}$ -Wertes kommt es wegen der oft stark verkrauteten Böschungen oder bei Niederwasser zu Werten von  $\frac{k_S}{4 \cdot R_{Hy}} > 0,1$ . In diesen Fällen betragen die Abweichung auch teilweise mehr als  $10\%$ . Die Unterschiede im  $k_{St}$ -Wert betragen dann bis zu  $12\%$ . Jedenfalls sind die Ergebnisse der DW-Gleichung in diesen Fällen heranzuziehen.

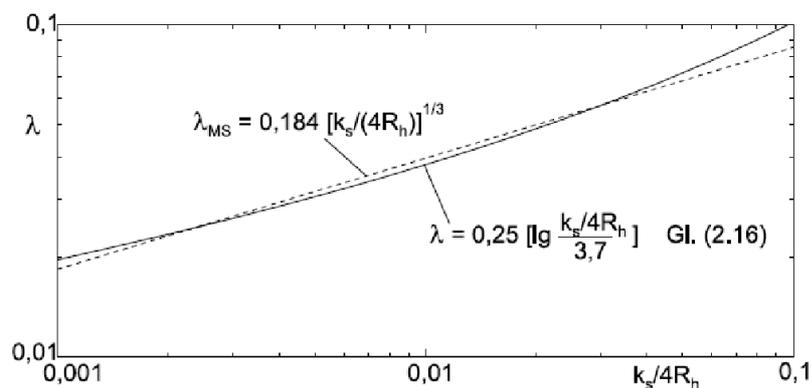


Abbildung 2.10: Vergleich des Reibungsbeiwertes  $\lambda$  für das hydraulisch raue Regime mit der Abschätzung nach der GMS-Formel (entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 118)

Im Folgenden wird auf den **Zusammenhang** zwischen der **GMS-** und der **DW-Formel** eingegangen. Nach [ATV-DVWK-A 110, 2001] (zit. in [KNAUF, 2003],

S. 2) besteht folgender Zusammenhang zwischen dem in der GMS-Formel verwendeten Strickler-Beiwert und der in der DW-Gleichung verwendeten äquivalenten Sandrauheit (dieser Zusammenhang wird durch Gleichsetzen der beiden Fließformeln (2-9) und (2-15) und unter Berücksichtigung von Gleichung (2-13), sowie einigen Umformungen erreicht):

$$k_{St} = \frac{26}{k_S^{\frac{1}{6}}} \quad (2-17)$$

Die Näherungsformel (2-17) ist, wie in Abbildung 2.11 zu sehen ist, nur bei relativ glatten Gerinnen anwendbar (bei  $k_{St}$ -Werten  $> 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ). Aus diesem Grund wird obige Gleichung modifiziert und der  $k_{St}$ -Wert in Abhängigkeit vom hydraulischen Radius folgendermaßen definiert (nach [DIN EN 752-4, 1997], zit. in [KNAUF, 2003], S. 2):

$$k_{St} = \frac{17,72}{R_{Hy}^{\frac{1}{6}}} * \log \left( \frac{14,84 * R_{Hy}}{k_S} \right) \quad (2-18)$$

In äquivalenter Form zu Gleichung (2-18) gilt nach [INDLEKOFER, 2003] (zit. in [PAUGAM, 2008], S. 19) folgende Schreibweise:

$$k_{St} = \frac{26}{(\kappa * k_S)^{\frac{1}{6}}} \quad (2-19)$$

In Gleichung (2-19) ist  $\kappa$  ein Korrekturbeiwert zur Berücksichtigung des Verhältnisses  $\frac{k_S}{R_{Hy}}$ . Für die Berechnung von  $\kappa$  gilt Formel (2-20):

$$\kappa = \frac{\frac{1,467}{\log \left( \frac{14,84}{\frac{k_S}{R_{Hy}}} \right)}}{\frac{k_S}{R_{Hy}}} \quad (2-20)$$

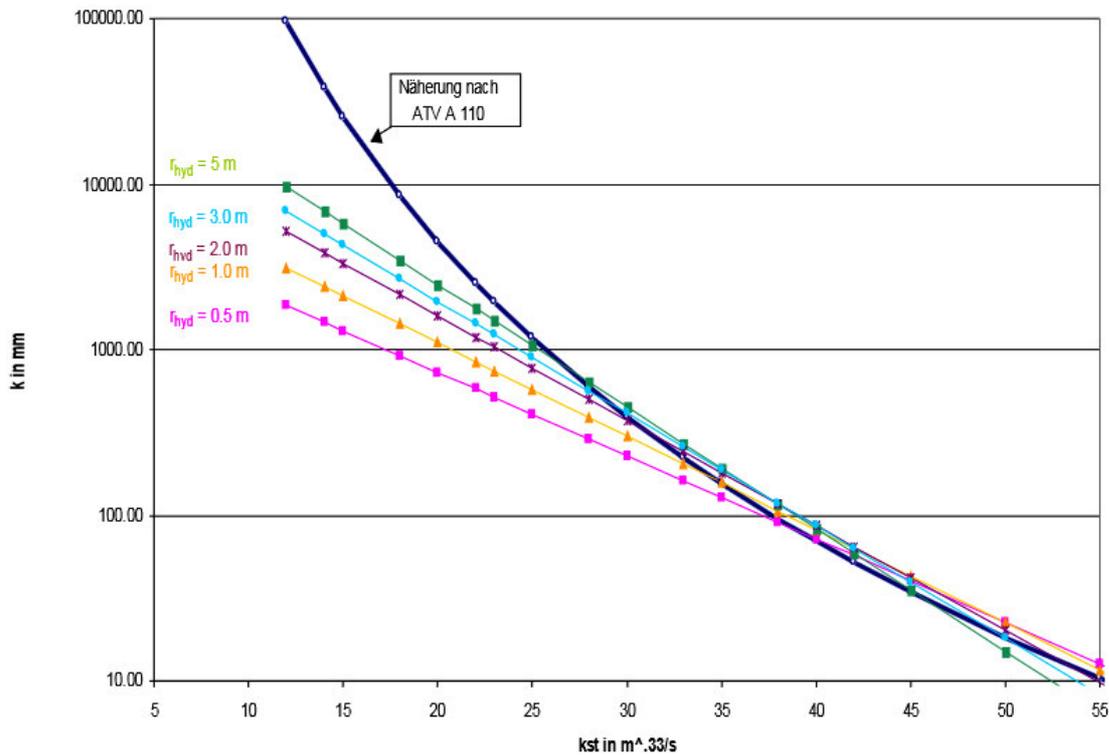


Abbildung 2.11: Zusammenhang zwischen  $k_S$  und  $k_{St}$  (nach [DIN EN 752-4, 1997], entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 3)

## 2.6 Berechnung von Gerinnen mit unterschiedlicher Sohl- und Böschungsrauheit

Genau genommen können die vorgestellten Fließformeln nur jeweils eine (einheitliche) Gerinnerauheit über den untersuchten Querschnitt berücksichtigen. Um dem entgegenzuwirken, bzw. um auch Strickler-Beiwerte für Sohle und Böschung getrennt voneinander angeben zu können, werden in diesem Abschnitt weitere Berechnungsmethoden vorgestellt.

Grundlage für nachfolgende Formeln ist die Annahme nach [EINSTEIN, 1934] und [HORTON, 1933]. Der Gesamtquerschnitt wird dabei in Teilflächen untergliedert (siehe Abbildung 2.12) und es wird jeweils die gleiche mittlere Fließgeschwindigkeit bei gleichem Energieliniengefälle vorausgesetzt (nach [HEINEMANN/PAUL, 1998], S. 132). Es kann ein „gewichteter“ äquivalenter  $k_{St}$ -Wert ermittelt werden.

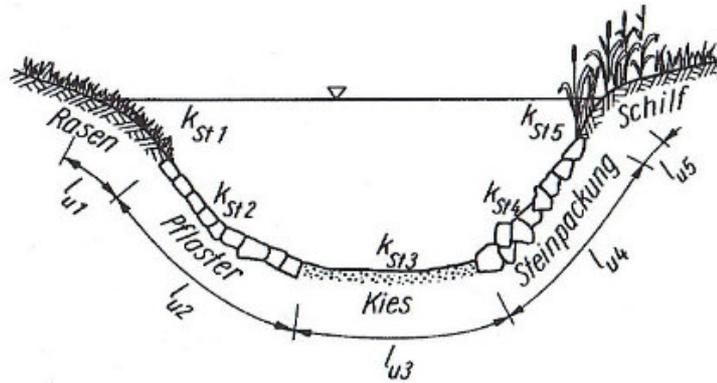


Abbildung 2.12: Gerinne mit Teilflächenzuordnung (nach [EINSTEIN, 1934] und [HORTON, 1933], entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S. 250)

Für das universelle Fließgesetz (DW-Gleichung) kann der Gesamtwiderstand  $\lambda_{Gesamt}$  aus dem Ansatz nach Gleichung (2-21) ermittelt werden:

$$U_{Gesamt} * \lambda_{Gesamt} = \sum (U_i * \lambda_i) \quad (2-21)$$

Außerdem können die hydraulischen Radien mittels Gleichung folgendermaßen (iterativ) ermittelt werden (wobei die Voraussetzung  $\sum A_i = A_{Gesamt}$  gelten muss):

$$R_{Hy,i} = \frac{A_i}{U_i} \quad (2-22)$$

Aus Gleichung (2-22) können durch Umformung die Teilflächen  $A_i$  ermittelt werden. Im Folgenden wird näher auf ein Berechnungsverfahren eingegangen, das auch bei Rückrechnung der Sohl- und Böschungrauheit verwendet wurden.

### 2.6.1 Erste Überlagerungsmethode nach INDLEKOFER

Diese Methode basiert auf der GAUCKLER-MANNING-STRICKLER-Gleichung. Um Ungenauigkeiten zu vermeiden, wird zur Umrechnung von  $k_{S,i}$  auf  $k_{St,i}$  der Korrekturbeiwert  $\kappa$  nach Formel (2-20) verwendet. Die iterative Ermittlung von  $R_{Hy,i}$  stellt die größte Schwierigkeit dar, da anfangs die einzelnen Teilflächen  $A_i$  unbekannt sind (nach [PAUGAM, 2008], S. 37).

Abbildung 2.13 zeigt das generelle Ablaufschema dieser Überlagerungsmethode. Der Index „i“ steht dabei für „Böschung“ oder „Sohle“. Im Prinzip wurden diese Formeln für die weiteren Berechnungen herangezogen, nur wurde anstelle des Ergebnisses  $k_{St,Gesamt}$  der Wert  $k_{St,Böschung}$  berechnet. Die äquivalente Sandrauheit der Sohle  $k_{S,Sohle}$  wurde fotografisch je Pegelstelle und Fluss dokumentiert und mittels Tabellenwerten abgeschätzt.

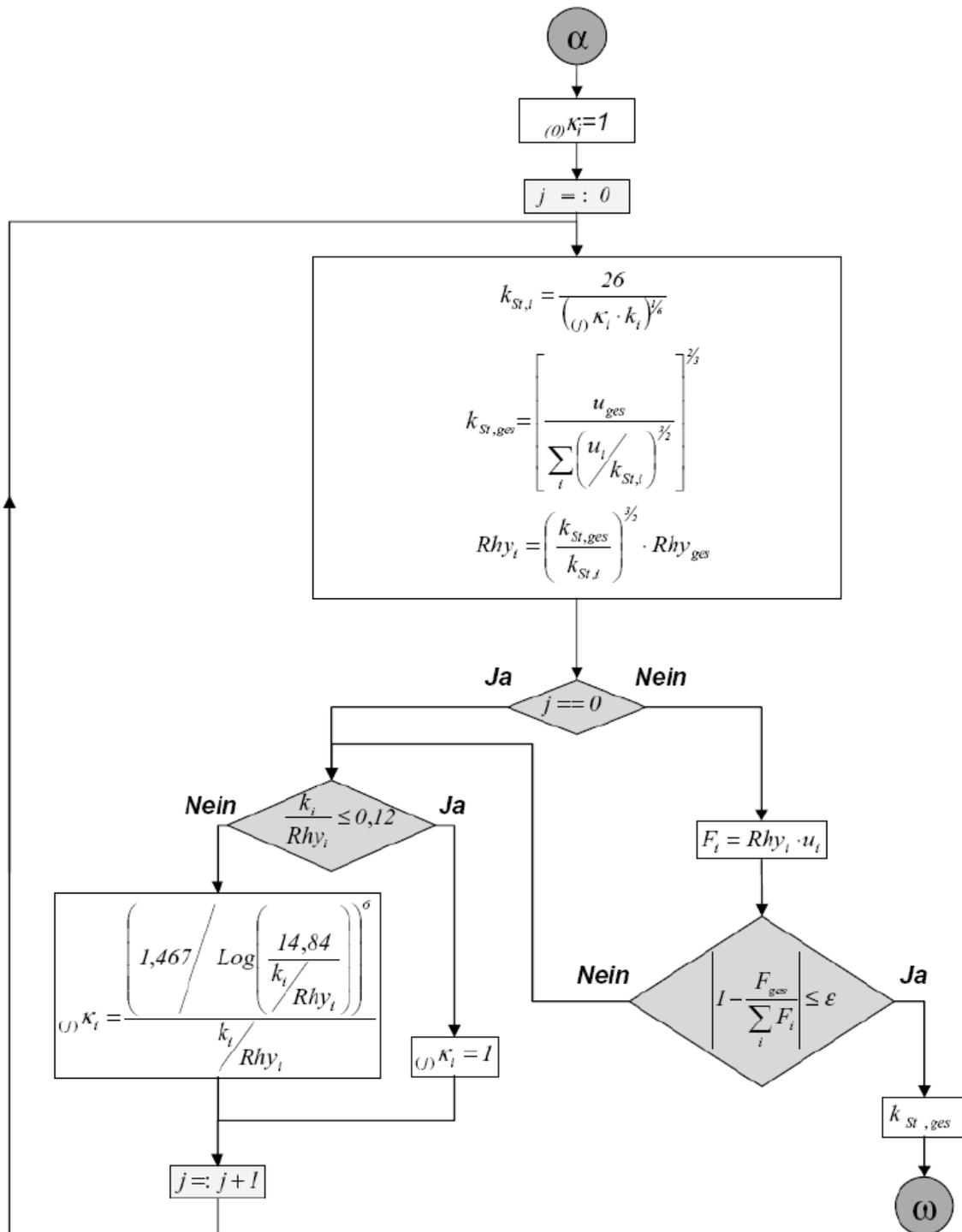
$\kappa_i, u_i, u_{ges}$ 

Abbildung 2.13: Überlagerungsmethode nach [INDLEKOFER, 2003] (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 40)

### 2.6.2 Näherung für den Reibungsansatz nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER

Mit den im Kapitel 2.6.1 ermittelten  $k_{St}$ -Werten für die Sohle (diese wurden mittels Iteration bestimmt wegen der Veränderlichkeit über die Fließtiefe) wurden Strickler-Beiwerte für die Böschung zusätzlich mittels eines Schätzverfahrens bestimmt. Nur bei einer ersten, ungefähren Abschätzung könnte die Rauheit der Sohle (ab einer größeren Wassertiefe) als konstant angenommen werden. Dieses Verfahren basiert auf den Überlegungen von EINSTEIN und HORTEN. Ein  $k_{St}$ -Wert für die Böschung kann aus der Umformung folgender Formel ermittelt werden, wobei  $U = \sum U_i$  ist:

$$k_{St,Gesamt} = \left[ \frac{\sum U_i}{\sum \left( \frac{U_i}{k_{St,i}^{3/2}} \right)} \right]^{2/3} \quad (2-23)$$

In Gleichung (2-23) sind die  $k_{St}$ -Werte nur vom jeweiligen benetzten Umfang abhängig, nicht vom hydraulischen Radius (und somit auch nicht von der relativen Rauheit bzw. Fließtiefe). Sind im Abflussquerschnitt nur zwei unterschiedliche Wandungsrauheiten vorhanden, kann Gleichung (2-23) vereinfacht angeschrieben werden:

$$k_{St,Gesamt} = \frac{U^{2/3} * k_{St,Sohle} * k_{St,Böschung}}{\left( U_{Sohle} * k_{St,Böschung}^{3/2} + U_{Böschung} * k_{St,Sohle}^{3/2} \right)^{2/3}} \quad (2-24)$$

Im nächsten Kapitel wird noch eine weitere, schnelle und einfache Methode gezeigt, um den Rauheitsbeiwert für den gesamten Gerinnequerschnitt abschätzen zu können.

### 2.7 Abschätzung des $k_{St}$ -Wertes nach COWAN

Ziel dieses Verfahrens ist die Ermittlung des Strickler-Beiwertes mithilfe von Teilbeiwerten. Diese Beiwerte sollen die Eigenschaften eines Gerinnes beschreiben. Nach [COWAN, 1956] ergibt sich der Wert  $n = 1/k_{St}$  zu:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad (2-25)$$

Die in Gleichung (2-25) vorkommenden Faktoren  $n_i$  und  $m_5$  sind in Tabelle 2.5 erklärt.

Tabelle 2.5: Faktoren zur Bestimmung des Manning-Beiwertes  $n$  nach [COWAN, 1956] (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 46)

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

Zwei Beispiele sollen die beschriebenen Teilfaktoren dieses Verfahrens erklären (siehe Abbildung 2.14 und Abbildung 2.15).



$n_0$	=	0,022
$n_1$	=	0,000
$n_2$	=	0,000
$n_3$	=	0,000
$n_4$	=	0,005 bis 0,010
$m_5$	=	1,100
$k_{st}$	≈	28 bis 34 m <sup>1/3</sup> /s

Abbildung 2.14: Ein größerer, schwach mäandrierender Bach mit einer feinkiesigen Sohle und stärkerem Böschungsbewuchs, der keinen natürlichen Lauf mehr aufweist (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 47)



$n_0$	=	0,020
$n_1$	=	0,000
$n_2$	=	0,002
$n_3$	=	0,000
$n_4$	=	0,045 bis 0,070
$m_5$	=	1,000
$k_{st}$	≈	10 bis 15 m <sup>1/3</sup> /s

Abbildung 2.15: Bach mit einer Sohle aus Erde und starkem Uferbewuchs (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 49)

## 2.8 Besonderheiten bei der Berechnung von Widerstandsbeiwerten

In diesem Kapitel wird auf einige Besonderheiten bei der Ermittlung von  $k_{St}$ -Werten natürlicher Gerinnequerschnitte eingegangen. Diese werden bei weiteren Berechnungen gegebenenfalls berücksichtigt bzw. wird auf diese gesondert hingewiesen.

### 2.8.1 Durchflusshysterese

Dieses „Phänomen“ kann beispielsweise beim Durchlaufen einer Hochwasserwelle in einem Gerinne beobachtet werden. Bei gleichem Wasserstand können zwei Durchflussmengen auftreten (siehe Abbildung 2.16):

- bei zunehmendem Durchfluss, z.B. beim „Anlaufen“ der Hochwasserwelle: das Durchflussvolumen ist größer (wegen größerem Energieliniengefälle)
- bei abnehmenden Durchflüssen, z.B. beim „Abklingen“ der Hochwasserwelle: das Durchflussvolumen ist kleiner (wegen kleinerem Energieliniengefälle)

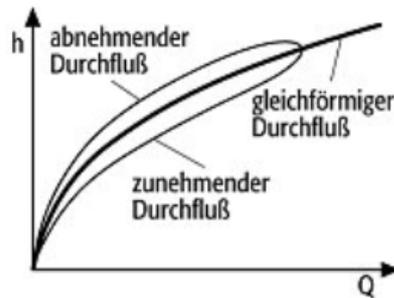


Abbildung 2.16: Durchflusshysterese (entnommen aus [GEODZ, 2014], Zugriff am 14. 02. 2015)

Teilweise wird dieser Umstand dadurch gemildert, dass der vor einer Hochwasserwelle vorhandene Bewuchs (Gräser und kleine Sträucher z.B.) noch aufgerichtet, nach dem Durchlaufen der Welle aber umgelegt sind. Daraus ergibt sich, dass der abnehmende Durchfluss wegen des geringeren Fließwiderstandes und somit höherem  $k_{St}$ -Wert wieder zunimmt. Bei Auswertungen der Wasserstands- und Durchflussdaten muss auf diesen Umstand geachtet werden (siehe Kapitel 4.6 beispielsweise).

### 2.8.2 Gerinne mit gegliedertem Querschnitt und Vegetation

In gegliederten Verbundprofilen (siehe Abbildung 2.17) mit zwei oder mehreren Querschnittsflächen mit oft stark unterschiedlichen Wassertiefen bzw. Rauheitsverhältnissen wird der Gesamtabfluss durch die Summe der Teilabflüsse ermittelt (nach [JIRKA, 2009], S. 26 f.).

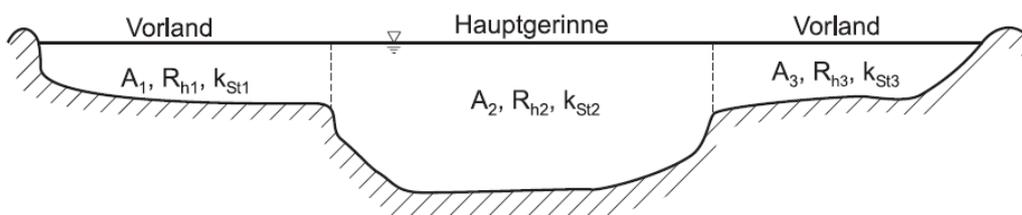


Abbildung 2.17: Variation des  $k_{St}$ -Wertes von Flüssen mit unregelmäßigen Fließquerschnitten (entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 27)

Es wird bei der Ermittlung eines Gesamtabflusses vorausgesetzt, dass das Energieliniengefälle für alle Teilquerschnitte gleich groß ist (diese Voraussetzung ist zu meist erfüllt). Ansonsten müsste für jedes  $A_i$  eine zugehörige Fließgeschwindigkeit  $v_i$  ermittelt werden und danach mithilfe der Kontinuitätsgleichung  $Q_i = v_i * A_i$  und Summation der einzelnen Durchflüsse  $Q$  ermittelt werden.

Als weitere Voraussetzung müssen die Trennflächen zwischen den Teilquerschnitten als interaktions- bzw. schubspannungsfrei angesehen werden. Indirekt können (im Falle einer Vernachlässigung des Trennflächenwiderstandes) die  **$k_{St}$ -Werte verringert**

werden. Bei den nachfolgenden Berechnungen wird diese Interaktion zwischen Vorland und Hauptgerinne jedenfalls auf diese Weise berücksichtigt (siehe Kapitel 4.3, 4.5 oder 4.6 beispielsweise).

Dass der **Einfluss der „Interaktions-Verluste“ zwischen den Teilquerschnitten** nicht unerheblich ist, zeigt das letzte Diagramm in Abbildung 2.18 (nach [VEN TE CHOW, 1959], S. 105). Bis zum Erreichen des borvollen Abflusses im Hauptgerinne (bis 21 ft = 6,4 m ca.) kann wegen der größeren Überdeckung der Sohle und der Böschung eine Abnahme des „Manning-n“ (und somit Zunahme des  $k_{St}$ -Wertes) beobachtet werden. Ab 21 ft werden die Vorländer überflutet und n nimmt wieder zu, bzw. der Strickler-Beiwert nimmt sprunghaft ab. Erklärt werden kann dieser Sprung durch entstehende, seitlich miteinander verbundener Teilströme von unterschiedlicher Geschwindigkeit, die in Wechselwirkung (Interaktion) treten und dadurch vermehrt Energie dissipieren. Ein ähnlicher Effekt tritt auch auf, wenn in einem Flussbett mit einem unregelmäßigen Fließquerschnitt der Wasserspiegel absinkt. Die Unregelmäßigkeiten werden mehr und mehr freigelegt und kommen dadurch stärker zur Wirkung. Die Wassertiefe variiert quer zur Strömungsrichtung und es entstehen seitliche Teilströme, die Fließenergie verbrauchen (nach [NAUDASCHER, 1992], S. 235).

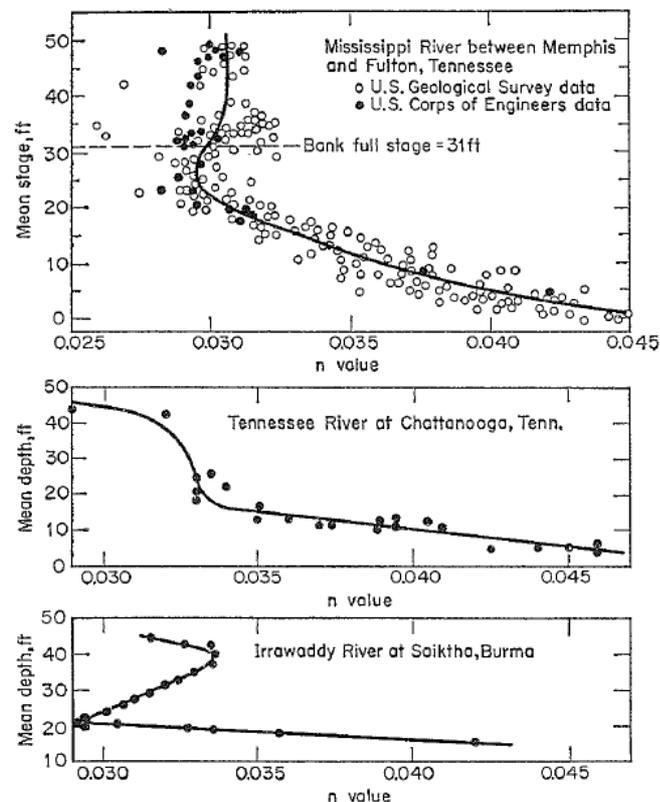


Abbildung 2.18: Variation des  $k_{St}$ -Wertes von Flüssen mit unregelmäßigen Fließquerschnitten (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 105)

Wie stark die Abflussleistung eines Gerinnes durch Interaktion von Teilströmen unterschiedlicher Geschwindigkeit beeinflusst wird, zeigt Abbildung 2.19. Sobald der Wasserstand die Vorlandsohle überschreitet, findet eine Interaktion zwischen der Strömung des Hauptgerinnes und der Strömung des stärker bewachsenen Vorlandes statt (energiereiche, relativ großräumige Wirbel). Wird hingegen bei sonst gleichen Versuchsbedingungen eine raue Wand an der Böschungsoberkante des Hauptgerinnes appliziert, bleibt das Wasser im Hauptgerinne. Trotz des geringeren Fließquerschnittes findet bei gleichem Wasserstand ein größerer Abfluss statt.

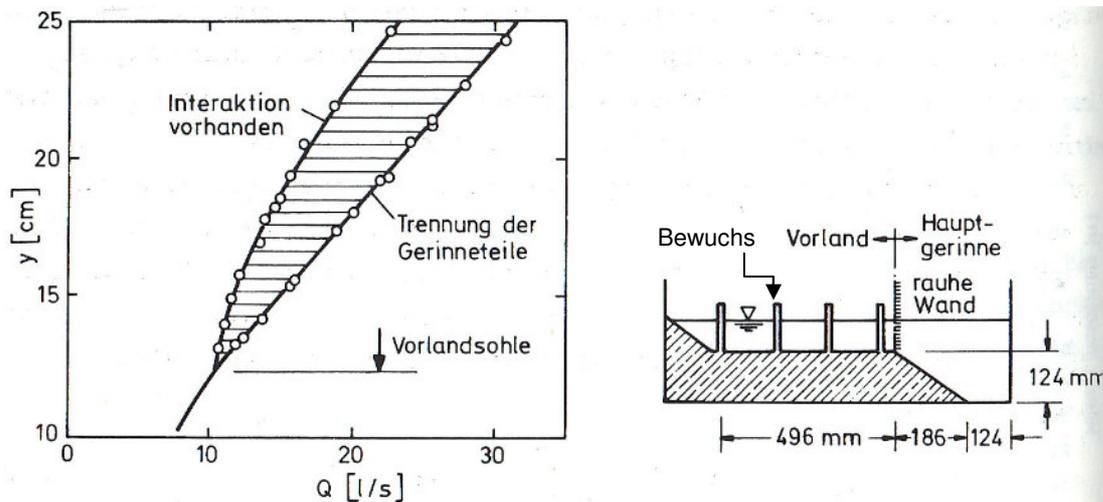


Abbildung 2.19: Abflusskurven für ein Gerinne im physikalischen Modellversuch mit stark von Vegetation besetztem Vorland (nach [EVERS, 1983], entnommen aus [NAUDASCHER, 1992], S. 236)

### 2.8.3 Gerinne mit beweglicher Sohle

Eine sehr wichtige Beeinflussung des Widerstands- und Abflussverhaltens stellt der **Schwebstoff- und Geschiebetransport** einerseits und die (auch damit verbundene) **Veränderung der Form der Gerinnesohle** (Kolke, Anlandungen, Dünenbildungen, etc.) andererseits dar. Besonders die Sohlen alluvialer Bachbetten (schluffige, sandige und kiesige Bestandteile v.a.) verändern sich bei unterschiedlichen Abflussmengen bzw. Froudezahlen (siehe Abbildung 2.20). Es kann also vorkommen, dass eine Flusssohle bei zunehmendem Abfluss bzw. Hochwasserabfluss rauer (etwa beim Übergang vom Zustand (a) zu (b) oder (c) zu (d)) oder glatter wird (vom Zustand (c) zu (d)). Auch eine Verlandung oder Freilegung von Riffeln und Bänken bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen kann wegen der unterschiedlichen Schwebstofffrachten eintreten. Die Folge einer solchen Änderung der Sohlenform für das zuletzt genannte Beispiel ist in Abbildung 2.21, (b) dargestellt (nach [NAUDASCHER, 1992], S. 242 f.).

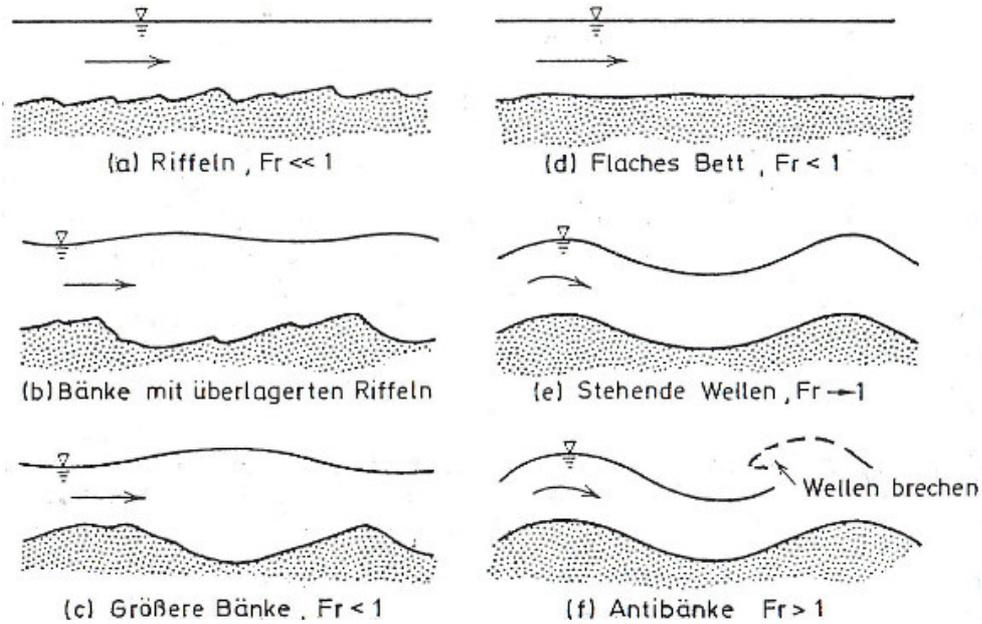


Abbildung 2.20: Sohlenformen in alluvialen Gerinnen – Froudezahl zunehmend von a nach f (entnommen aus [NAUDASCHER, 1992], S. 242)

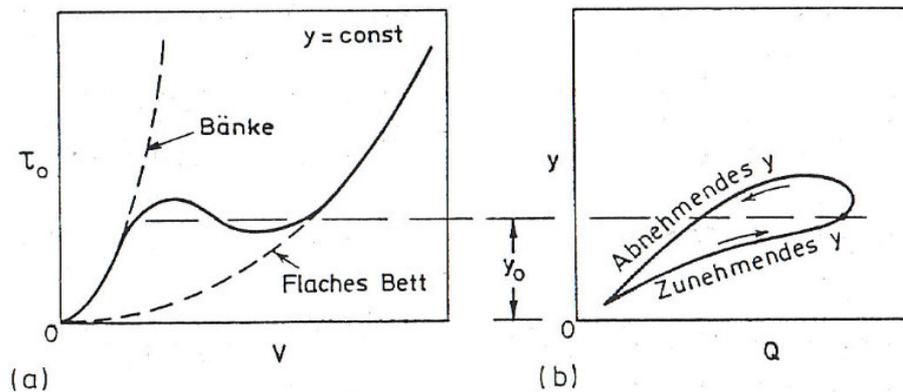


Abbildung 2.21: Einfluss der veränderlichen Sohlenform auf (a) die Sohlenschubspannung  $\tau_0$  für eine konstante Tiefe  $y$  und (b) die Wasserstandslinie für den Hochwasserabfluss (entnommen aus [NAUDASCHER, 1992], S. 243)

Obwohl sich beispielsweise für den Zickenbach relativ kleine Werte für die äquivalente Sandrauheit ergeben, wird wegen größerer Sohlunebenheiten der Wert für  $k_s$  höher angesetzt (siehe Kapitel 4.3).

### 3 Zusammenstellung von Rauheitsbeiwerten aus der Literatur

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über die in der Literatur angeführten Rauheitsbeiwerte gegeben. Weiters sind Untersuchungen angeführt, die für einen oder mehrere Wasserstände bzw. Durchflüsse Strickler-Beiwerte angeben.

#### 3.1 Werte für die äquivalente Sandrauheit $k_s$

Tabelle 3.1: Typische äquivalente Sandrauheiten  $k_s$  [mm] von offenen Gerinnen (nach [DVWK, 1991], entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 22, verändert)

Einzelrauheiten		$k_s$ [mm]
Ebene Fließgewässersohle aus	Sand oder Kies ( $d_{k,90}$ = Korndurchmesser, der von 90 % des Materials unterschritten wird)	$d_{k,90}$
	Grobkies	60-200
	schwere Steinschüttung	200-300
Unebene Fließgewässersohle ( $h_T$ = Höhe des Transportkörpers)	mit Riffeln ( $\lambda_T < 0,3$ m; $h_T < 0,05$ m)	$h_T$
	mit Dünen ( $\lambda_T < 2\pi h$ ; $h_T < 0,06\lambda_T$ )	$h_T = h/6 - h/3$
Böschungen mit	Rasen	60
	Gras	100-350
	Gras und Stauden	130-400
	Steinschüttung 80/450 mm mit Gras überwachsen	300

Tabelle 3.2: Typische äquivalente Sandrauheiten  $k_s$  [mm] (entnommen aus [LfU 3, 2002], S. 17 f., verändert)

Einzelrauheiten	Literatur, Jahr	$k_s$ [mm]
<b>Gerinnerauheiten</b>		
Mauerwerk aus Bruchstein	[SCHNEIDER, 1994]	15-40
Felswände, gute Bearbeitung	[SCHNEIDER, 1994]	7,5-75
Raue Natursteinmauer	[SCHNEIDER, 1994]	80-100
	[DVWK, 1991]	
Steinschüttung	[SCHNEIDER, 1994]	200-300
	[DVWK, 1991]	
	[BOLLRICH, 1996]	100-150
	[SCHRÖDER, R. C., 1966]	bis 500
Sand oder Kies	[SCHNEIDER, 1994]	$d_{90}$ (Korn)
	[DVWK, 1991]	
Grobkies	[SCHNEIDER, 1994]	60-200
	[DVWK, 1991]	
	[SCHRÖDER, R. C., 1966]	
Flusskies, Geröll	[BOLLRICH, 1996]	50-100
<b>Vorländer und Böschungen</b>		
Ackerboden	[SCHNEIDER, 1994] [DVWK, 1991]	20-250
Acker mit Kulturen	[SCHNEIDER, 1994] [DVWK, 1991]	250-800
Waldboden	[SCHNEIDER, 1994] [DVWK, 1991]	160-320
Gras	[DVWK, 1991]	100-350
Gras und Stauden	[DVWK, 1991]	130-400
Steinpackung	[BOLLRICH, 1996]	150-200
Steinschüttung 80/450 mit Gras überwachsen	[DVWK, 1991]	300

Tabelle 3.3: Unterschiedliche Ansätze für die Beziehung zwischen äquivalenter Sandrauheit und charakteristischem Korndurchmesser (entnommen aus [LfU 2, 2002], S. 21)

Autor	Ansatz
[GARBRECHT, 1961]	$k_S = d_{90}$
[ENGELUND, 1966]	$k_S = 2 d_{65}$
[HEY, 1979]	$k_S = 3,5 d_{84}$
[KAMPHIUS, 1974]	$k_S = 2 d_{50}$
[MERTENS, 1996]	$k_S = 2,5 d_{50}$
[DITTRICH, 1998] Kies	$k_S = 3,5 d_m$
Grobkies, Steine	$k_S = 3,5 d_{84}$

### 3.2 Werte für den Strickler-Beiwert ( $k_{St}$ -Wert)

Tabelle 3.4 zeigt eine Auflistung von Rauheitsbeiwerten verschiedener Flusscharakteristika, Böschungen und Vorländer. Eine weitere Zusammenstellung fotografischer Aufnahmen von durchgeführten Untersuchungen ist auf den nächsten Seiten dargestellt.

Tabelle 3.4: Zusammenstellung von  $k_{St}$ -Werten für offene Gerinne und Vorlandbereiche (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 21 bzw. [LfU 3, 2002], S. 12, verändert)

Gerinnecharakteristik	$k_{St}$ -Wert [m <sup>1/3</sup> /s]	Literaturquelle
<b>Natürliche Flüsse</b>		
Natürliche Flussbetten mit fester Sohle, ohne Unregelmäßigkeiten	40	[ZUPPKE, 1992] [LANGE, 1993] [NAUDASCHER, 1992] [SCHRÖDER, W., 1994]
	40 – 42	[RÖSSERT, 1994]
Natürliche Flussbetten mit Geröll und Unregelmäßigkeiten	28 – 30	[ZUPPKE, 1992]
	30	[RÖSSERT, 1994] [BOLLRICH, 1996] [LANGE, 1993] [NAUDASCHER, 1992] [SCHRÖDER, W., 1994]
Natürliche Flussbetten mit mäßigem Geschiebetrieb	33 – 35	[ZUPPKE, 1992] [SCHRÖDER, W., 1994]
	35 – 38	[RÖSSERT, 1994]

Natürliche Flussbetten mit starker Geschiebeführung	30	[BOLLRICH, 1996]
	28	[LANGE, 1993] [NAUDASCHER, 1992] [SCHRÖDER, W., 1994]
Natürliche Flussbetten, Ufer verkrautet	30 – 35	[SCHRÖDER, W., 1994]
Natürliche Flussbetten, verkrautet	30 – 35	[LANGE, 1993] [NAUDASCHER, 1992]
(kleinere) natürliche Flüsse mit HW-Abflussbreiten < 30 m	22 – 30	[VEN TE CHOW, 1959]
gleichmäßig gewunden, einige Mulden und Untiefen	13 – 20	
mit Stillwasserbereichen, verkrautet, tiefe Mulden	ca. 10	
sehr verkrautete Bereiche, tiefe Mulden oder Vorländer mit dichtem Baumbestand und Unterholz		
<b>Kanäle und künstliche Gerinne</b>		
Erdkanäle aus Sand, Kies, Lehm – stark bewachsen	20 – 26	[RÖSSERT, 1994]
	20 – 25	[LANGE, 1993] [NAUDASCHER, 1992] [SCHRÖDER, W., 1994]
Erdkanäle, stark bewachsen	25	[BOLLRICH, 1996]
Erdkanäle, stärker bewachsen	32,5 – 34,5	[DVWK, 1990]
Erdkanäle, stark verkrautet	24,5 – 29	
<b>Vorlandbereiche, Böschungen</b>		
Flussvorland mit Vegetation	30	[BOLLRICH, 1996]
unebenes, bewachsenes Vorland	15 – 25	[SCHRÖDER, W., 1994]
Vorland, je nach Bewuchs	20 – 25	[RÖSSERT, 1994]

Als nächstes werden diverse **Untersuchungen zur Bestimmung** des „**Manning's n**“ oder **Strickler-Beiwert** angeführt. Diese basieren auf Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessungen, sowie einer Vermessung von einem oder mehreren Querschnitten des Gerinnes in einem gewissen Abstand zueinander. Außerdem wurden diese Messungen zumeist für unterschiedliche Wasserstände bzw. Durchflüsse durchgeführt.

Explizit wird jeweils auf die Literaturquelle bereits im Text hingewiesen. Eine Zusammenstellung dieser findet sich auch im Kapitel „weiterführende Literatur“ und im Anhang.

### 3.2.1 Untersuchungen von VEN TE CHOW

Chow, Ven Te: Open-channel hydraulics. New York, NY [u.a.]: McGraw-Hill, 1959.

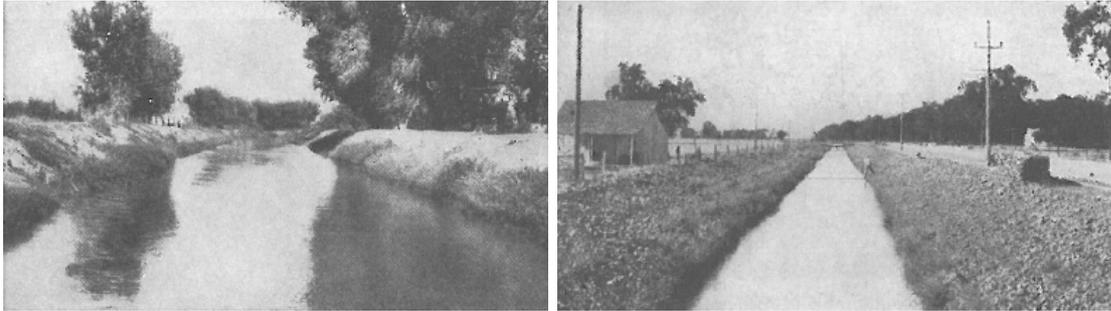


Abbildung 3.1: links (Gerinne aus Ton bis Feinsand):  $k_{St} = 56 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (Gerinne aus schluffigem Ton):  $k_{St} = 42 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.)

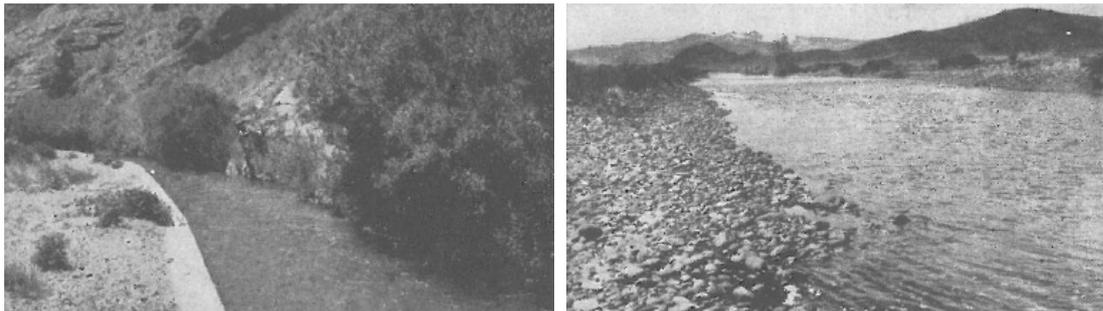


Abbildung 3.2: links (Gerinne, im Fels ausgehoben; oberer Bereich der Böschung: Weiden, unterer Teil: Beton):  $k_{St} = 38 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (Gerinne, grobkiesiges Sohlmaterial):  $k_{St} = 36 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.)



Abbildung 3.3: links (Erdkanal mit alluvialen Bestandteilen, Böschung mit Gras bewachsen):  $k_{St} = 34 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (naturnahes Gerinne, Sohle aus Ton und Lehm mit eher unregelmäßiger Böschung):  $k_{St} = 29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.)



Abbildung 3.4: links (Gerinne, Sohle aus Ton und sandigem Lehm, Querschnitt und Böschung unregelmäßig):  $k_{St} = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (Graben, Sohle und Böschung unregelmäßig, stark verachsen mit Weiden und größeren Bäumen):  $k_{St} = 17 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.)



Abbildung 3.5: links (Gerinne, Sohle aus Ton und Lehm, Sohle und Böschung stark verachsen):  $k_{St} = 13 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (natürliches Gerinne, unebene Sohle aus sandigem Ton, unregelmäßige Böschung, viele Wurzeln, Sträucher und Bäume im Gerinne):  $k_{St} = 7 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.)

### 3.2.2 Untersuchungen von BARNES

Barnes, Harry H., Jr.: Roughness Characteristics of Natural Channels. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849. Washington: United States Government Printing Office, 1967.

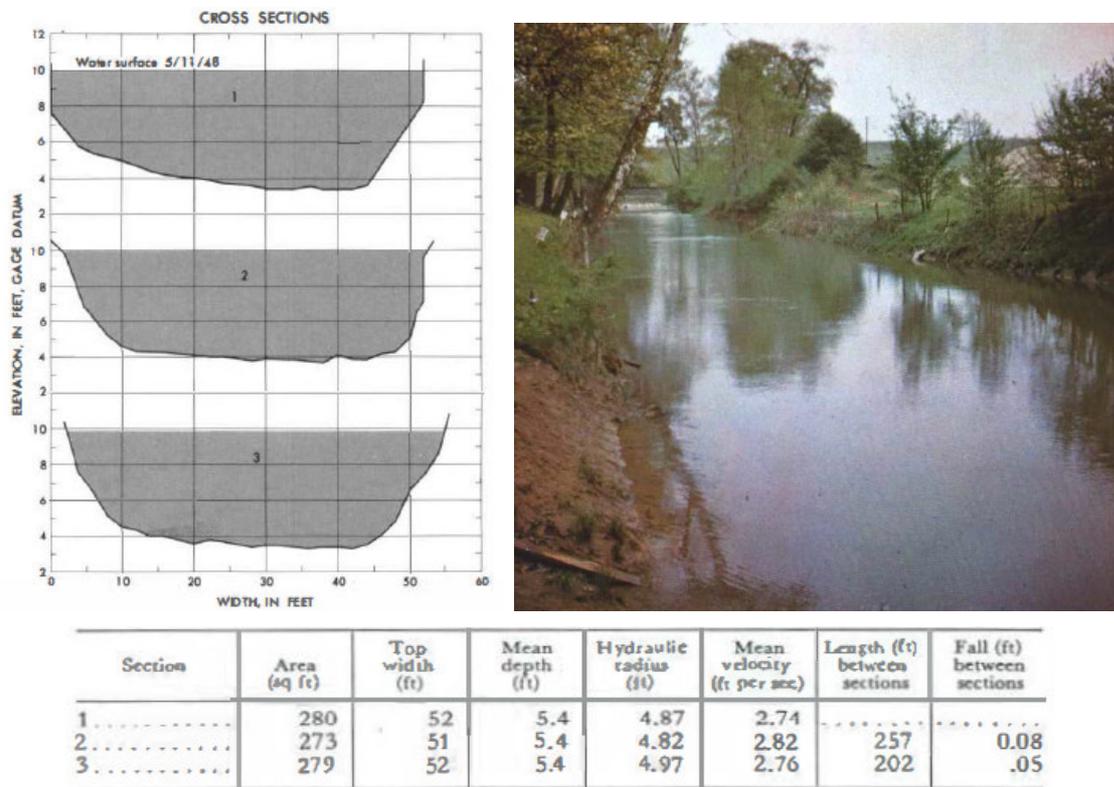


Abbildung 3.6: Indian Fork below Atwood Dam, near New Cumberland, Ohio: Sohle aus Ton und Schluff hauptsächlich, Gefälle: ca. 0,3 %:  $k_{St} = 38 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 14 ff.)

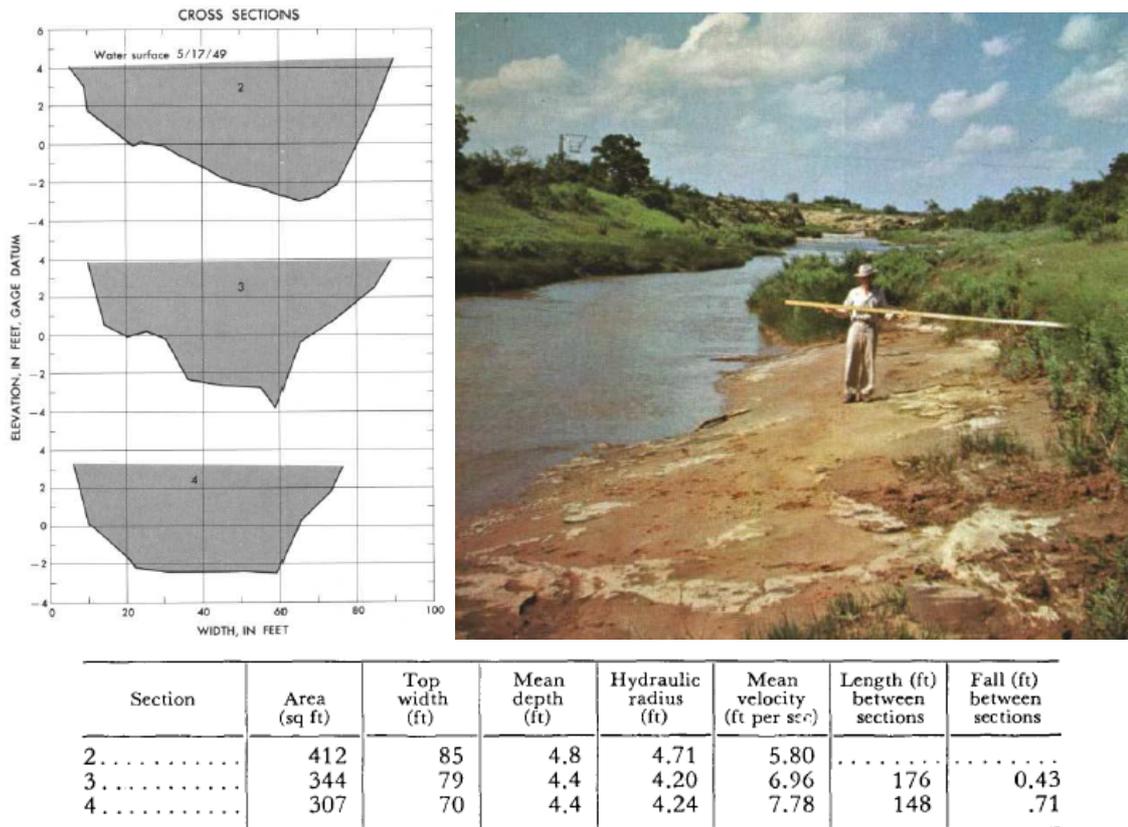


Abbildung 3.7: Champlin Creek near Colorado City, Tex.: Sohle aus Fein- und Grobkies, sowie Steinanteilen, Gefälle: 3,6 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 37 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 18 ff.)

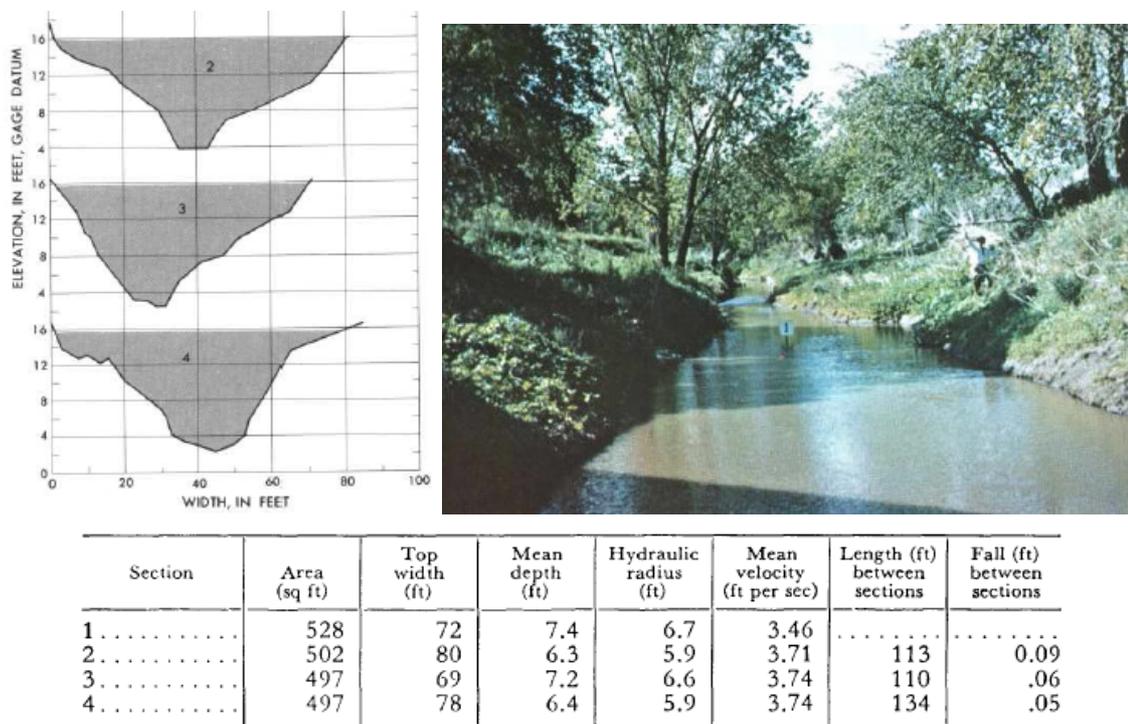
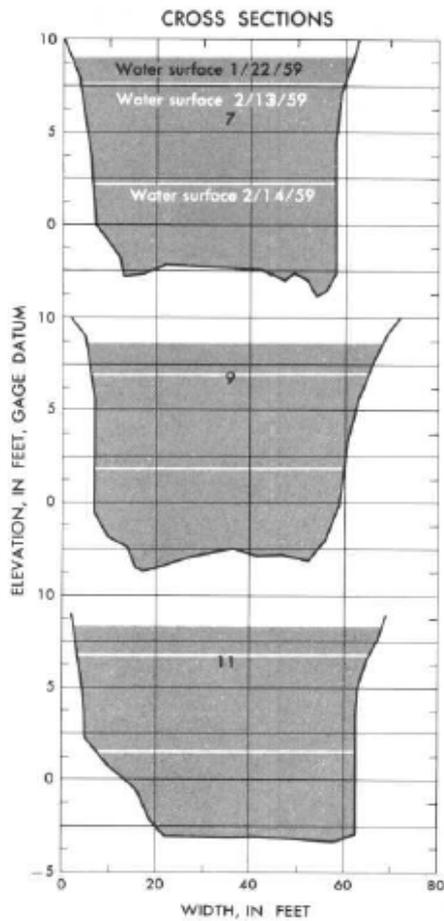
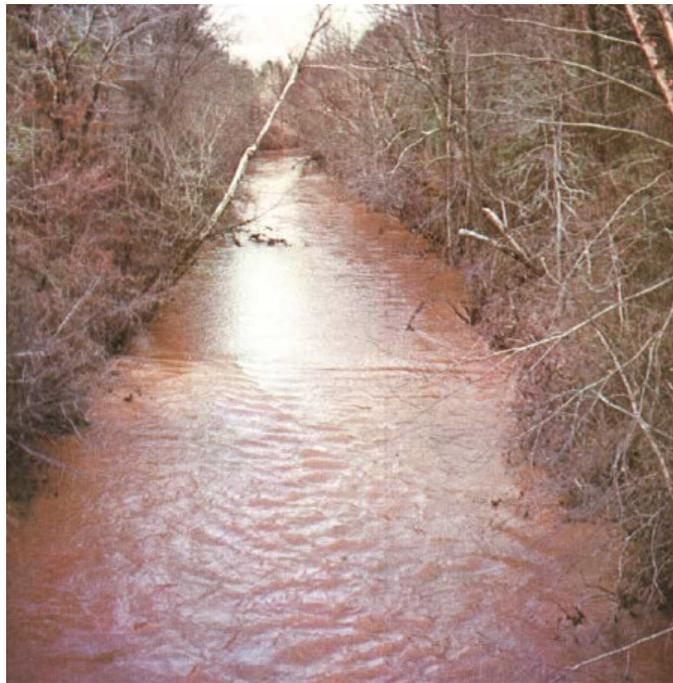
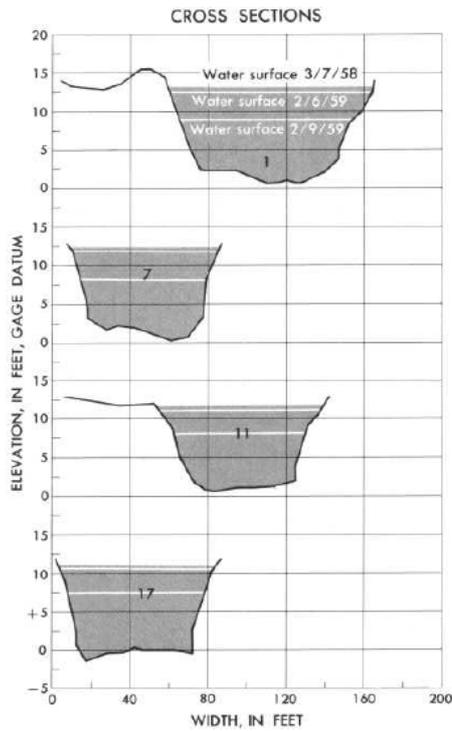


Abbildung 3.8: Salt Creek at Roca, Nebr.: Sohle aus Ton bis Sand, Gefälle: 0,6 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 38 ff.)



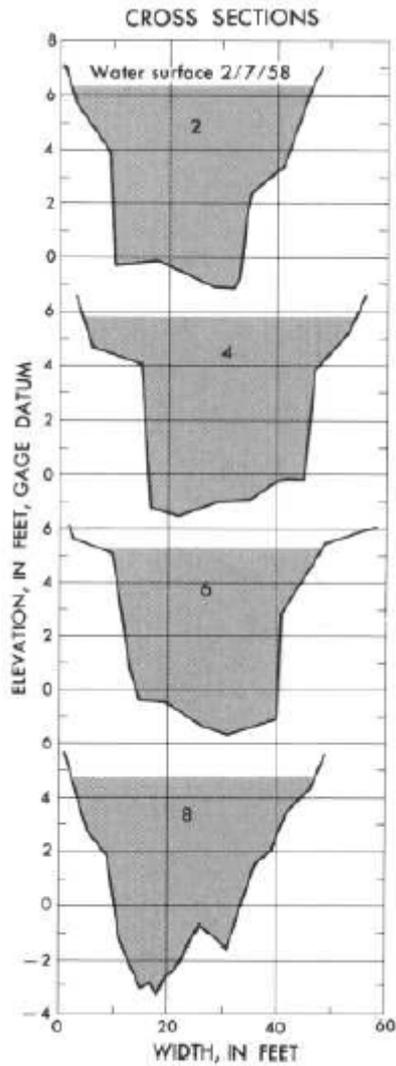
Section	Area (sq ft)	Top width (ft)	Mean depth (ft)	Hydraulic radius (ft)	Mean velocity (ft per sec)	Length (ft) between sections	Fall (ft) between sections
<b>Jan. 22, 1959</b>							
7.....	618	60	10.3	8.15	3.66	.....	.....
8.....	621	66	9.4	7.77	3.64	316	0.22
9.....	619	63	9.8	8.18	3.65	286	.18
10.....	610	63	9.7	7.77	3.70	293	.14
11.....	622	66	9.4	7.89	3.63	203	.17
<b>Feb. 13, 1959</b>							
7.....	528	57	9.3	7.37	3.50	.....	.....
8.....	531	64	8.3	6.95	3.48	316	0.19
9.....	532	59	9.0	7.56	3.48	286	.20
10.....	525	61	8.6	7.00	3.52	293	.14
11.....	530	62	8.6	7.10	3.49	203	.14
<b>Feb. 14, 1959</b>							
7.....	240	51	4.7	4.04	2.15	.....	.....
8.....	209	59	3.5	3.27	2.46	316	0.16
9.....	235	53	4.4	4.04	2.19	286	.17
10.....	203	59	3.4	3.19	2.54	293	.19
11.....	219	55	4.0	3.59	2.35	203	.15

Abbildung 3.9: Etowah River near Dawsonville, Ga.: Sohle aus Sand und Kies und umgestürzten Bäumen, Gefälle: 0,6 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 24 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 22. 01. 59,  $k_{St} = 26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 13. 02. 59 und  $k_{St} = 29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 14. 02. 59 (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 66 ff.)



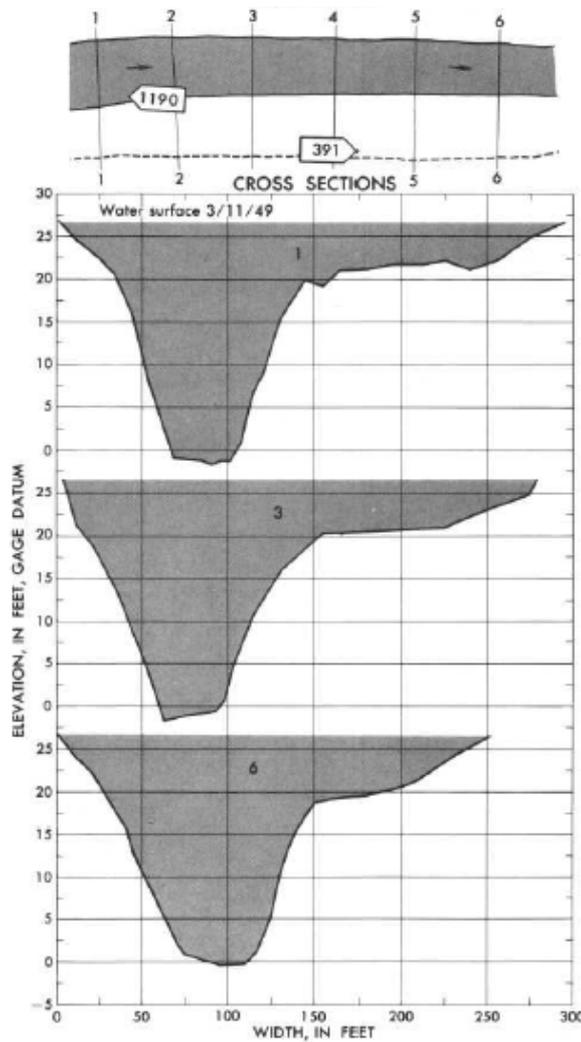
Section	Area (sq ft)	Top width (ft)	Mean depth (ft)	Hydraulic radius (ft)	Mean velocity (ft per sec)	Length (ft) between sections	Fall (ft) between sections
<b>Mar. 7, 1958</b>							
3.....	768	85	9.0	7.84	3.31	.....	.....
7.....	700	76	9.2	7.69	3.63	652	0.60
11.....	700	87	8.0	7.29	3.63	731	.58
14.....	761	80	9.5	8.36	3.34	495	.27
17.....	770	82	9.4	8.28	3.31	469	.36
<b>Feb. 6, 1959</b>							
3.....	700	81	8.8	7.65	3.20	.....	.....
7.....	640	74	8.7	7.40	3.50	652	0.60
11.....	625	83	7.6	6.80	3.58	731	.58
14.....	700	76	9.1	7.90	3.20	495	.27
17.....	715	79	9.1	8.00	3.13	469	.21
<b>Feb. 9, 1959</b>							
3.....	435	73	6.1	5.55	2.90	.....	.....
7.....	405	64	6.3	5.50	3.11	652	0.48
11.....	375	69	5.6	5.00	3.36	731	.60
14.....	450	64	6.5	5.85	2.80	495	.33
17.....	455	69	6.6	5.75	2.77	469	.30

Abbildung 3.10: Tobesofkee Creek near Macon, Ga.: Sohle aus Sand und Kies und einigen größeren Steinen, Gefälle: 0,7 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 23 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 07.05. 58,  $k_{St} = 24 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 06.02. 59 und  $k_{St} = 26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 09.02. 59 (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 94 ff.)



Section	Area (sq ft)	Top width (ft)	Mean depth (ft)	Hydraulic radius (ft)	Mean velocity (ft per sec)	Length (ft) between sections	Fall (ft) between sections
2.....	215	45	4.8	4.21	3.93	.....	.....
3.....	212	42	5.0	4.20	3.99	78	0.21
4.....	227	50	4.5	4.02	3.73	124	.35
5.....	202	43	4.7	4.02	4.19	92	.21
6.....	187	41	4.6	3.74	4.52	71	.35
7.....	200	48	4.2	3.64	4.23	88	.11
8.....	198	45	4.4	3.94	4.27	149	.38

Abbildung 3.11: Murder Creek near Monticello, Ga.: Sohle aus Sand und Kies, Gefälle: 3 % im Mittel:  $k_{St} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 130 ff.)



Section	Area (sq ft)	Top width (ft)	Mean depth (ft)	Hydraulic radius (ft)	Mean velocity (ft per sec)	Length (ft) between sections	Fall (ft) between sections
<b>Main channel</b>							
1 .....	2,301	143	16.1	14.25	2.51	.....	.....
2 .....	2,304	139	16.6	15.33	2.51	136	0.011
3 .....	2,524	152	16.6	15.50	2.28	103	.028
4 .....	2,416	140	17.2	15.95	2.39	127	.014
5 .....	2,544	147	17.3	16.12	2.27	117	.004
6 .....	2,483	150	16.6	15.52	2.32	86	.033
<b>Right overflow channel</b>							
1 .....	668	150	4.4	4.44	0.48	.....	.....
2 .....	643	138	4.7	4.63	.50	136	0.011
3 .....	601	124	4.8	4.83	.54	103	.028
4 .....	602	120	5.0	5.00	.54	127	.014
5 .....	593	112	5.3	5.27	.55	117	.004
6 .....	513	104	4.9	4.93	.63	86	.033

Abbildung 3.12: Rolling Fork near Boston, Ky.: Sohle aus Ton und Schluff, Gefälle: 0,2 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  im Flussschlauch und  $k_{St} = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  im bei Hochwasser überströmten Vorlandbereich (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 138 ff.)

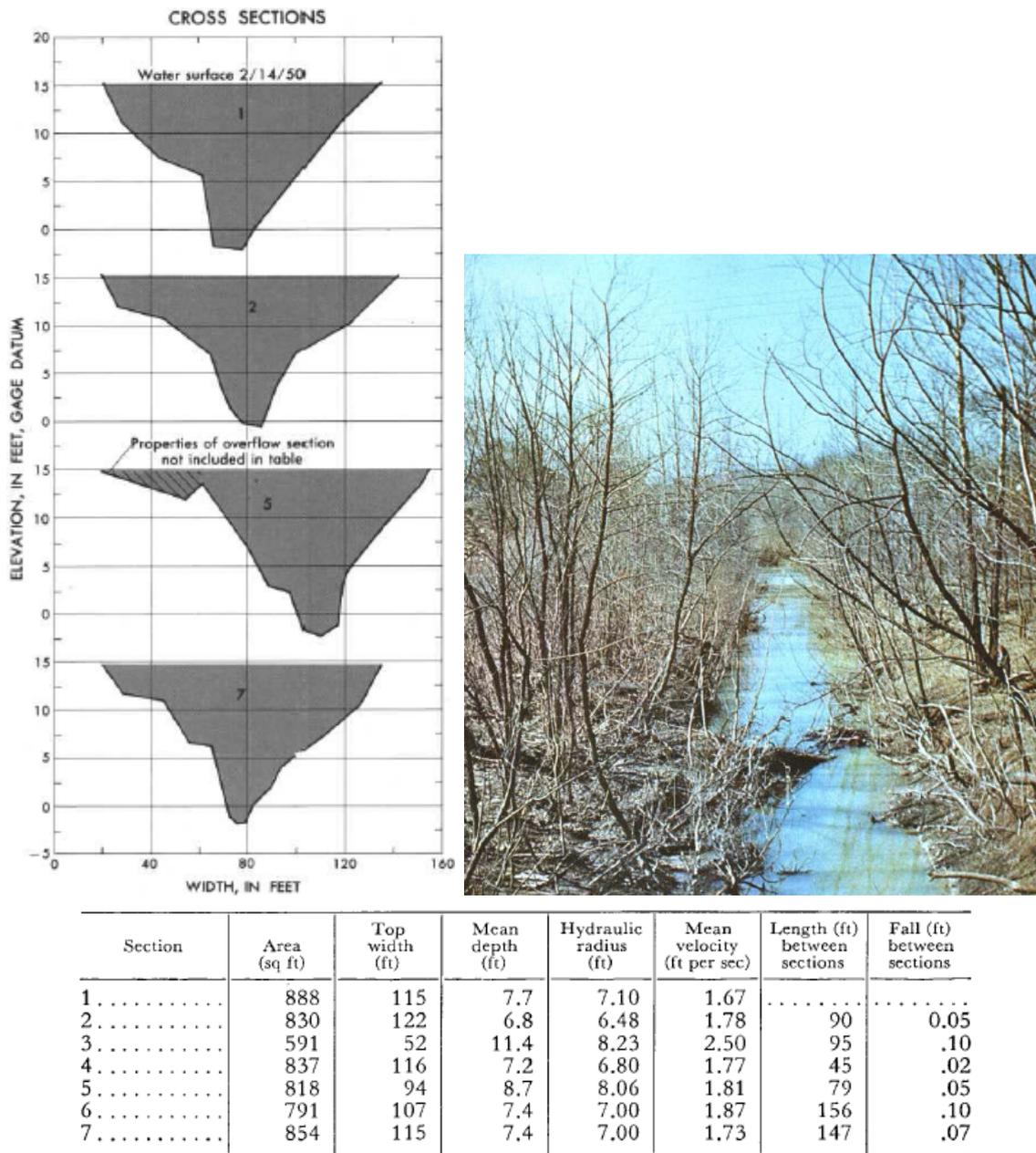


Abbildung 3.13: Pond Creek near Louisville, Ky.: Sohle aus Schluff und Feinsand, Gefälle: 0,7 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 14 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 198 ff.)

### 3.2.3 Untersuchungen von SPREAFICO, HODEL und KASPAR

Spreafico, M.; Hodel, H.P.; Kaspar, H.: Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern. Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque Nr. 1. Bern: 2001.

Hydrometrische Station:	Suze – Sonceboz
Einzugsgebiet:	195 km <sup>2</sup>
Regimetyyp:	nivo-pluvial jurassien
Mittlerer Abfluss:	4.3 m <sup>3</sup> /s
10-jährliches Hochwasser:	37 m <sup>3</sup> /s
Gefälle:	3 ‰
Abflussgerinne:	Künstliches geradliniges Trapezprofil mit flach verputztem Uferschutz, welcher teilweise überwachsen ist. Im Abflussprofil wachsen vereinzelt grössere Büsche. In der Kiessohle liegen grössere Blöcke

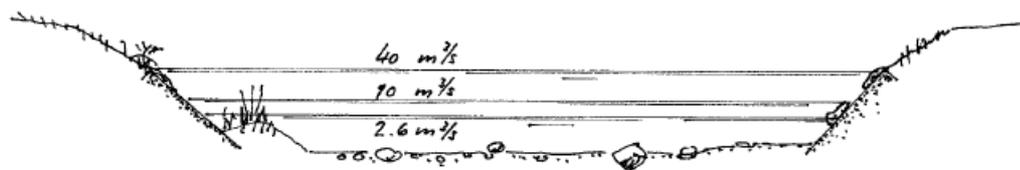
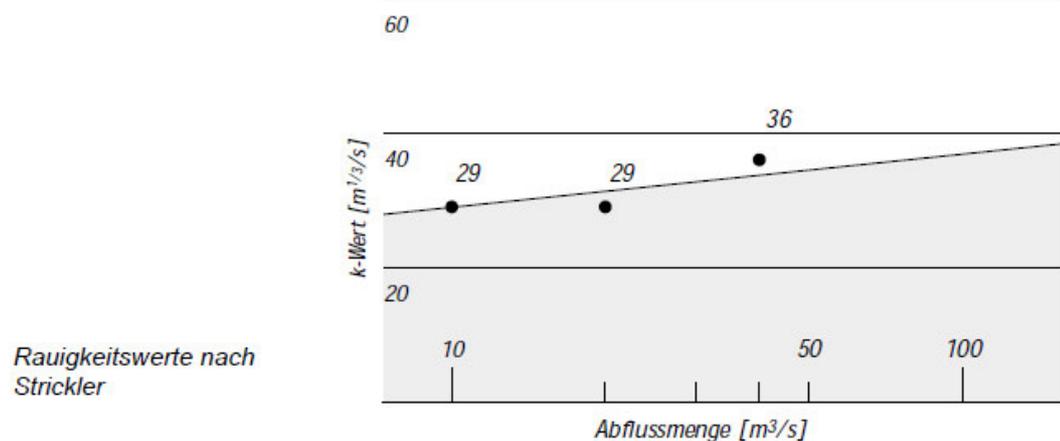


Abbildung 3.14: Versuchsstrecke Suze - Sonceboz, Sohlbreite ca. 10 m; Foto: Fluss in Fließrichtung betrachtet; Abflussmenge 2,4 m<sup>3</sup>/s (entnommen aus [SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001], S. 37 ff.)

Hydrometrische Station:	Gürbe – Belp, Stockmatt
Einzugsgebiet:	124 km <sup>2</sup>
Regimetyt:	pluvial supérieur
Mittlerer Abfluss:	2.6 m <sup>3</sup> /s
10-jährliches Hochwasser:	44 m <sup>3</sup> /s
Gefälle:	1.7 ‰
Abflussgerinne:	Künstliches Trapezprofil mit Sohle aus Sand und Kies. Ufer mit Gras bewachsen, vereinzelt mit Schilfpflanzen

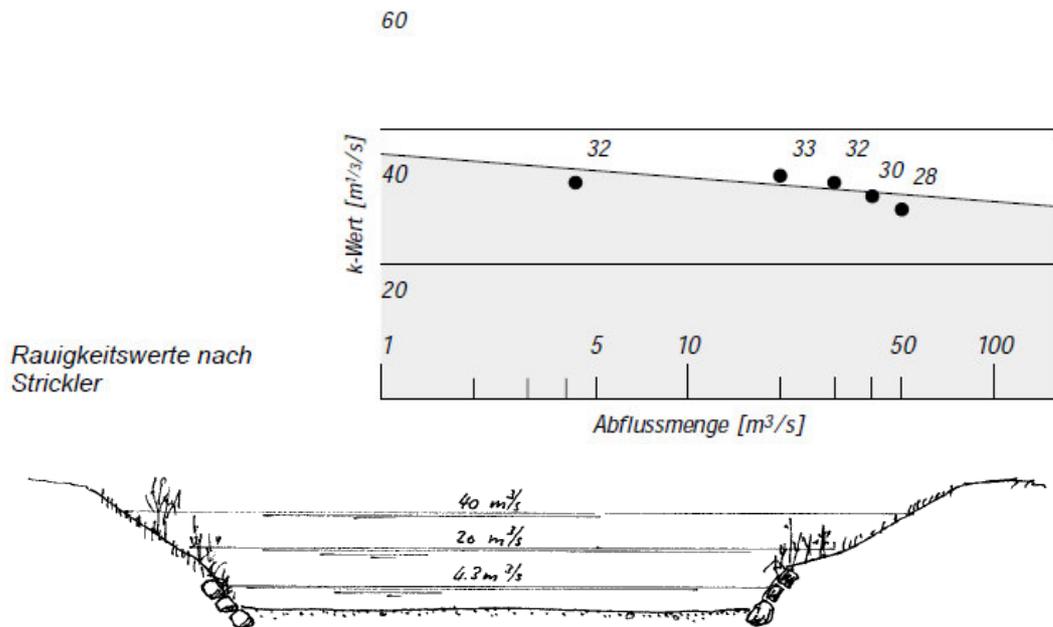


Abbildung 3.15: Versuchsstrecke Gürbe - Belp, Sohlbreite ca. 12 m; Foto: Fluss gegen die Fließrichtung betrachtet; Abflussmenge 0,6 m<sup>3</sup>/s (entnommen aus [SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001], S. 43 ff.)

Hydrometrische Station:	Emme – Burgdorf, Lochbach
Einzugsgebiet:	673 km <sup>2</sup>
Regimetyt:	nivo-pluvial préalpin
Mittlerer Abfluss:	17 m <sup>3</sup> /s
10-jährliches Hochwasser:	360 m <sup>3</sup> /s
Gefälle:	3.6 ‰
Abflussgerinne:	Künstliches Trapezprofil mit Kiessohle. Uferschutz aus Blocksatz, überwachsen

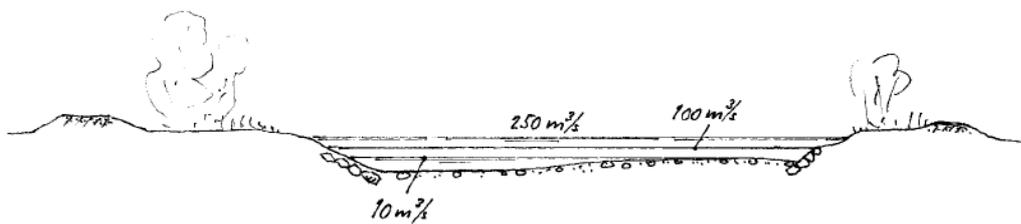
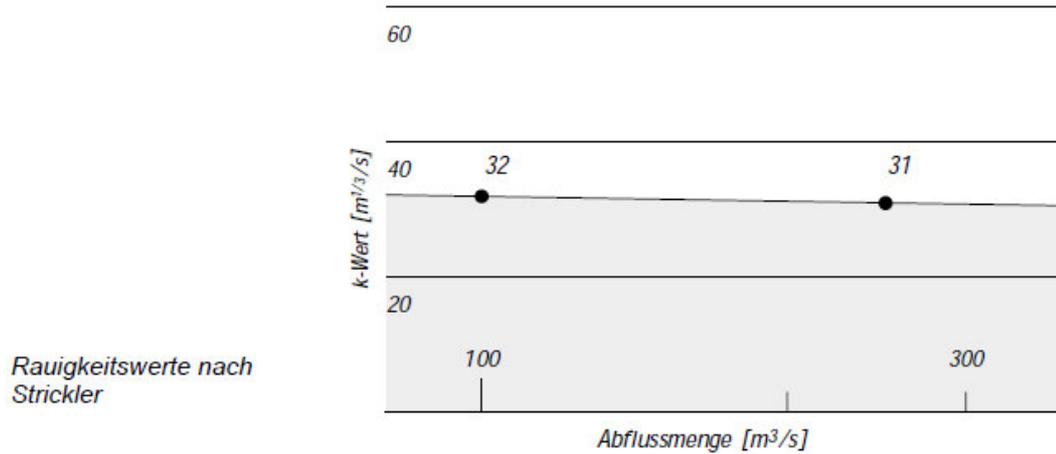


Abbildung 3.16: Versuchsstrecke Emme - Burgdorf, Sohlbreite ca. 40 m; Foto: gegen die Fließrichtung schauend; Abflussmenge 2,1 m<sup>3</sup>/s, (entnommen aus [SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001], S. 49 ff.)

Hydrometrische Station:	Glatt – Fällanden (Kanton Zürich)
Einzugsgebiet:	167 km <sup>2</sup>
Regimetyt:	Seeausfluss
Mittlerer Abfluss:	4 m <sup>3</sup> /s
10-jährliches Hochwasser:	16 m <sup>3</sup> /s
Gefälle:	0.3 ‰
Abflussgerinne:	Geradliniges Trapezprofil. Uferschutz bis auf die Höhe des mittleren Wasserstandes aus Blockwurf, darüber abwechselungsweise Gras und Schilf. Sohle aus Kies und Steinen

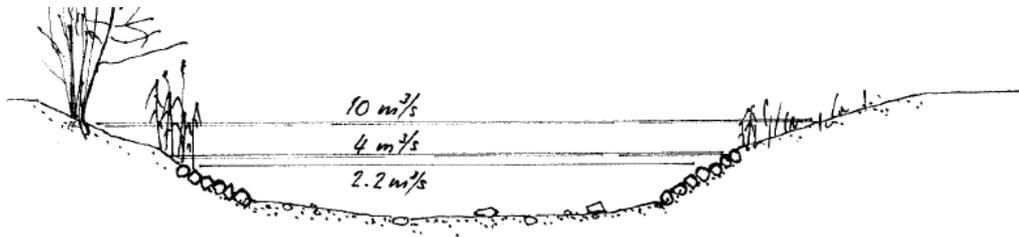
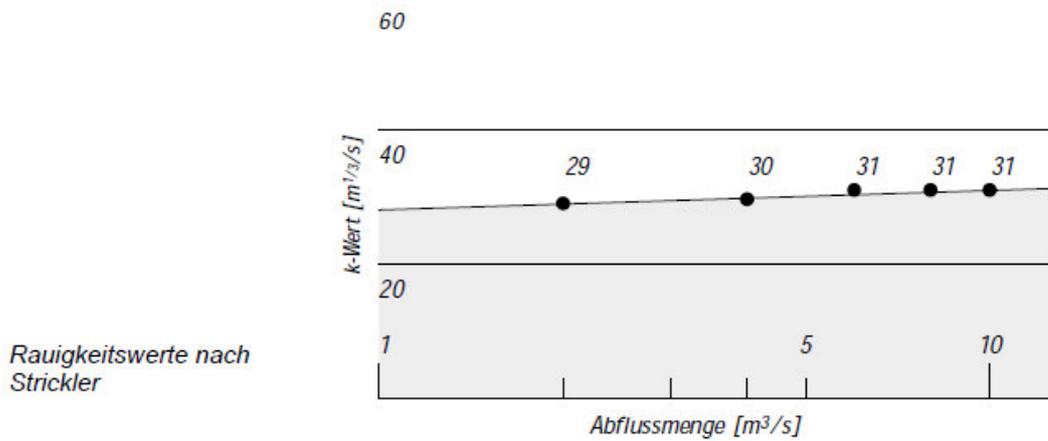


Abbildung 3.17: Versuchsstrecke Glatt - Ausfluss des Greifensees, Sohlbreite ca. 9 m; Foto: in Fließrichtung schauend; Abflussmenge 1,7 m<sup>3</sup>/s (entnommen aus [SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001], S. 55 ff.)

### 3.2.4 Untersuchungen der LfU Baden-Württemberg

Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Hydraulik naturnaher Fließgewässer: Teil 3- Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg. 1. Auflage; Karlsruhe, 2002.

**Rotach bei Friedrichshafen (Rotach-km 1+150)**

$k_{st} \approx 26 \text{ bis } 34 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

#### Allgemeine Informationen über den Gewässerabschnitt

Abschnittscharakteristik	Der betrachtete Gewässerabschnitt befindet sich unterhalb des Pegels Friedrichshafen/Rotach (Rotach-km 1+150). Das Mittelwasserbett ist mit Sohlenschwellen und Wasserbausteinen stabilisiert. Oberhalb des Mittelwasserbetts ist das Gewässer mit Gras und einzelnen Bäumen bewachsen.
mittleres Sohlprofil	$I_{So}$ ca. 0,002

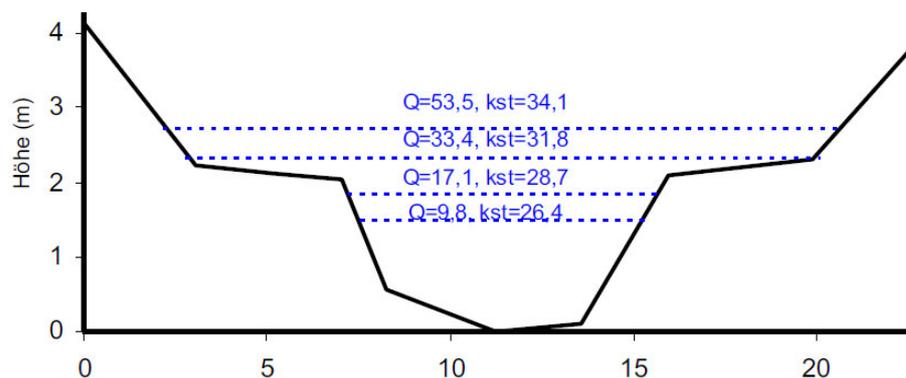
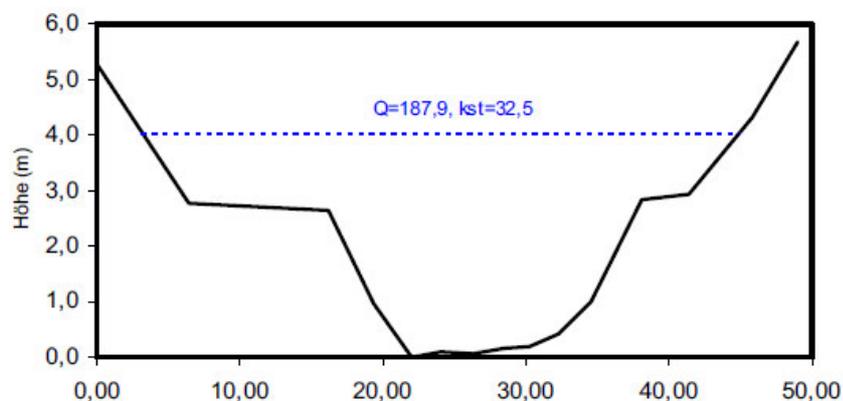


Abbildung 3.18: Rotach bei Friedrichshafen (Kurzbeschreibung, Foto, Querschnitt);  $k_{st}$ -Wert = 26 bis 34  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$  (nach [LfU 3, 2002], S. 29 f.)

Neckar bei Horb (Neckar-km 287+000)

 $k_{st} \approx 32,5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ **Allgemeine Informationen über den Gewässerabschnitt**

Abschnittscharakteristik	Der betrachtete Gewässerabschnitt befindet sich unterhalb des Pegels Horb/Neckar. Die Sohle des Gewässers weist einen gleichmäßigen, geraden Verlauf ohne Mulden und Untiefen auf und besteht aus sandigem bis kiesigem Material. Die Uferböschungen sind mit Gräsern sowie Sträuchern und Bäumen bewachsen.
mittleres Sohlprofilgefälle	$I_{So}$ ca. 0,0018

**Interpretation der dargestellten  $k_{st}$ -Werte:**

Die dargestellten  $k_{st}$ -Werte stammen aus einer eindimensionalen hydraulischen Berechnung eines Abflussereignisses. Das verwendete hydrodynamisch-numerische Modell wurde anhand von Naturdaten kalibriert.

Abbildung 3.19: Neckar bei Horb (Kurzbeschreibung, Foto, Querschnitt und Interpretation des  $k_{st}$ -Wertes);  $k_{st}$ -Wert (bei HQ) =  $32,5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (nach [LfU 3, 2002], S. 40 ff.)

Enz Bereich 1 (km 56+530)	$k_{st} \approx 13 \text{ bis } 52 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
---------------------------	--

#### Allgemeine Informationen über den Gewässerabschnitt

Abschnittscharakteristik	Gegliedertes Gerinne mit gerader Linienführung. Die Sohle ist unregelmäßig mit grobem Geröll bedeckt. Auf den Vorländern und entlang der Böschungen ist Grasbewuchs.
Gerinneklassifizierung	Gegliedertes Gerinne
mittleres Sohlprofilgefälle	$I_{So}$ ca. 0,00185
Kartengrundlage TK 25	Blatt 7018 (Pforzheim)
<i>Hydrologische Kennwerte</i>	
nächstgelegener Pegel	Pforzheim-Kläranlage
Einzugsgebietsgröße	1478 km <sup>2</sup>
MNQ	5,12 m <sup>3</sup> /s
MQ	17,20 m <sup>3</sup> /s
MHQ	161,00 m <sup>3</sup> /s

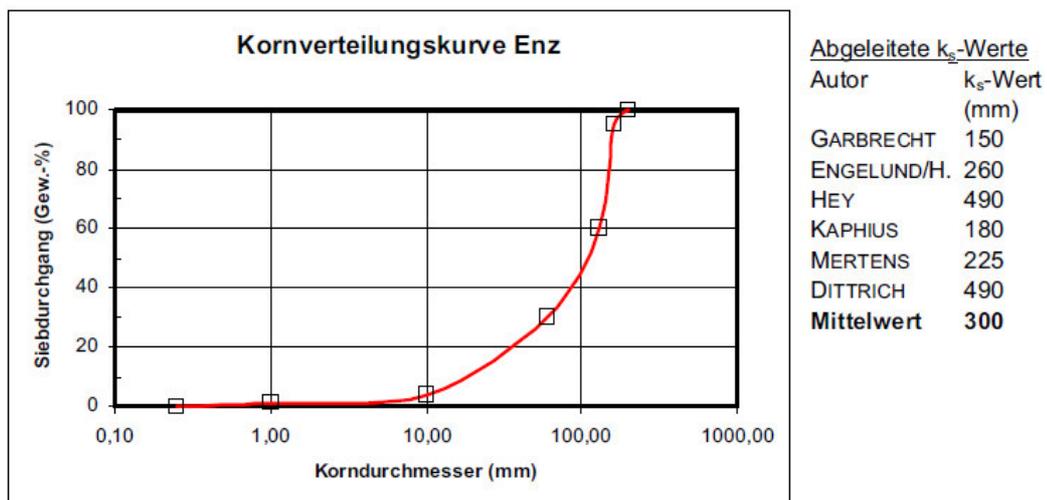
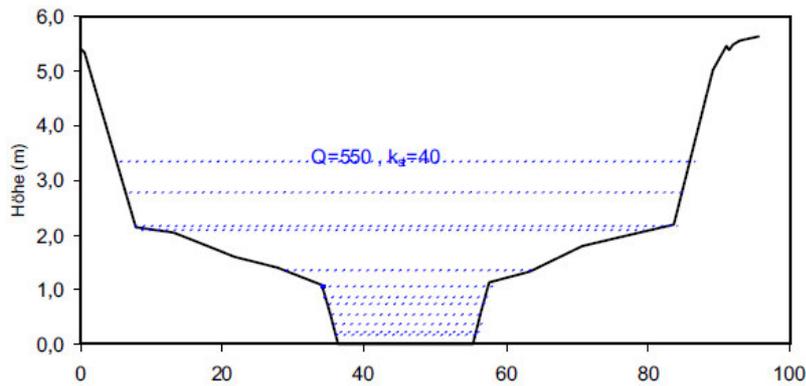
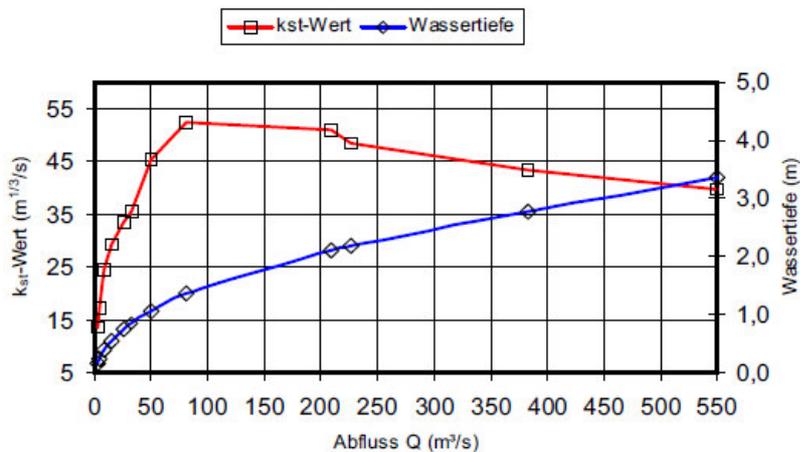


Abbildung 3.20: Enz bei km 56+530 (Kurzbeschreibung, Foto und Kornverteilungskurve);  $k_{st}$ -Wert (bei HQ) = 13 bis 52 m<sup>1/3</sup>/s (nach [LfU 3, 2002], S. 79 ff.)



Abfluss [m³/s]	A [m²]	$r_{hy}$ [m]	$v_m$ [m/s]	$k_{st}$ [m <sup>1/3</sup> /s]	h [m]
2,12	7,36	0,36	0,29	13,3	0,16
3,50	8,61	0,41	0,41	17,1	0,22
8,48	11,99	0,55	0,71	24,5	0,38
15,13	15,47	0,69	0,98	29,2	0,54
25,83	19,97	0,85	1,29	33,4	0,74
33,00	22,52	0,94	1,47	35,4	0,85
49,66	28,38	0,85	1,75	45,5	1,06
80,46	40,04	0,84	2,01	52,3	1,35
208,90	87,64	1,13	2,38	50,9	2,09
227,04	95,14	1,23	2,39	48,5	2,17
382,34	140,87	1,75	2,71	43,4	2,77
550,00	187,74	2,26	2,93	39,6	3,35



#### Interpretation der dargestellten $k_{st}$ -Werte:

Die gezeigten  $k_{st}$ -Werte resultieren aus einer hydraulischen Rückrechnung von Naturmessdaten. Hierbei wurde in dem betrachteten Gewässerabschnitt von Normalabflussbedingungen ausgegangen.

Die Wasserstands-Abfluss-Beziehung und die  $k_{st}$ -Wert-Abfluss-Beziehung steigen bis zum bordvollen Abfluss des Mittelwasserbettes (bei  $h = 1,30$  m ca.) sehr rasch an. Dies liegt daran, dass mit zunehmender Fließtiefe die Auswirkung der Sohlrauheit nachlässt, wodurch der  $k_{st}$ -Wert größer wird.

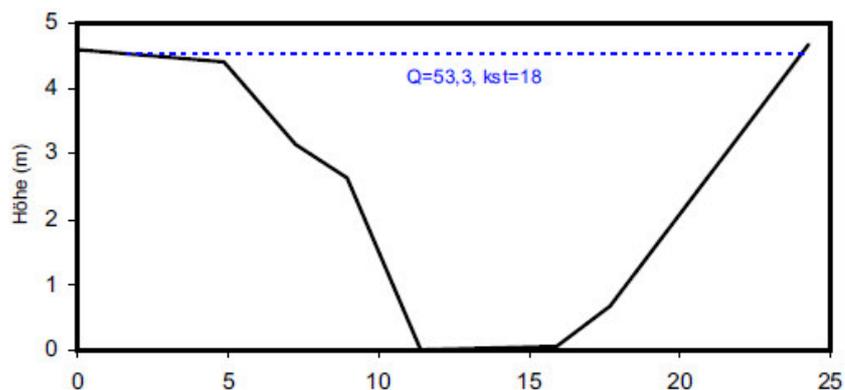
Ab ca. 1,30 m Wassertiefe beginnt die Ausuferung und die Vorländer werden überflutet. Aufgrund dieser Überströmung nehmen die Strickler-Beiwerte ab. Weil der Abflussanteil im Vorland bei einer geringen Überströmung fast vernachlässigbar ist, fällt der  $k_{st}$ -Wert zunächst nicht stark ab. Erst ab einer deutlichen Überdeckung der Vorländer (ab einer Fließtiefe von ca. 2,20 m) nimmt der Abflussanteil der Vorländer am Abflussgeschehen derart zu, dass sich der dortige  $k_{st}$ -Wert signifikant auf den  $k_{st}$ -Wert des gesamten Querschnittes auswirkt. Der Rauheitsbeiwert nimmt mit zunehmender Wassertiefe weiter ab. Der Grund hierfür ist unter anderem die bereits angesprochene Wirbelbildung, bei der Fließenergie verbraucht wird.

Enz bei km 56+530 (Querschnitt, tabellarische Ergebnisse, Pegelschlüssel inkl. Verlauf der  $k_{st}$ -Werte und Interpretation der  $k_{st}$ -Werte);  **$k_{st}$ -Wert = 13 bis 52 m<sup>1/3</sup>/s** (nach [LfU 3, 2002], S. 79 ff.)

Ohrn in der Ortslage Öhringen	$k_{St} \approx 18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
-------------------------------	--

#### Allgemeine Informationen über den Gewässerabschnitt

Abschnittscharakteristik	Der betrachtete Gewässerabschnitt erstreckt sich innerhalb der Ortslage Öhringen von der Brücke Austraße im Industriegebiet bis ca. 245 m nach oberstrom. Die Gewässersohle ist durch schlammartige Ablagerungen gekennzeichnet. Die Böschungen sind mit Gras bewachsen. Entlang der Böschungsoberkante säumen Bäume und Sträucher, die vereinzelt in die Uferböschung hineinragen, den Gewässerabschnitt.
mittleres Sohlprofilgefälle	$I_{So}$ ca. 0,0009



#### Interpretation der dargestellten $k_{St}$ -Werte:

Die dargestellten  $k_{St}$ -Werte stammen aus einer eindimensionalen hydraulischen Berechnung eines Abflussereignisses. Das verwendete hydrodynamisch-numerische Modell wurde anhand von Naturdaten kalibriert.

Die Ergebnisse der Modellkalibrierung ergeben für den bordvollen Abfluss einen sehr rauen  $k_{St}$ -Wert von ca.  $18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Dies liegt zum einen an der geringen Gerinnebreite und zum anderen an den großflächigen Uferböschungen, die mit Gras, Gestrüpp und vereinzelt mit Sträuchern und Bäumen bewachsen sind.

Abbildung 3.21: Ohrn in der Ortslage Öhringen (Kurzbeschreibung, Foto, Querschnitt und Interpretation des  $k_{St}$ -Wertes);  $k_{St}$ -Wert =  $18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (nach [LfU 3, 2002], S. 38 f.)

### 3.2.5 Untersuchungen von KNAUF

Basierend auf: Knauf, D.: Rauheitsbeiwerte - Zusammenhang zwischen Rauheitsbeiwerten nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER und den äquivalenten Rauheitsbeiwerten nach Prandtl-Colebrook im hydraulisch rauen Bereich. Wasser u. Abfall 4-5, 2003. <http://www.psw-knauf.de/download/Gewaesser-Rauheiten.pdf>, Zugriff am 24. 11. 2014



Abbildung 3.22: Böschung bzw. Vorland (Gras, Wiese):  $k_{St} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 34)



Abbildung 3.23: Naturnahes Gewässer (Bach, Ufer unregelmäßig):  $k_{St} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 11)



Abbildung 3.24: Natürliches Gewässer (Bach mit Wurzelgeflechten):  $k_{St} = 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 12)



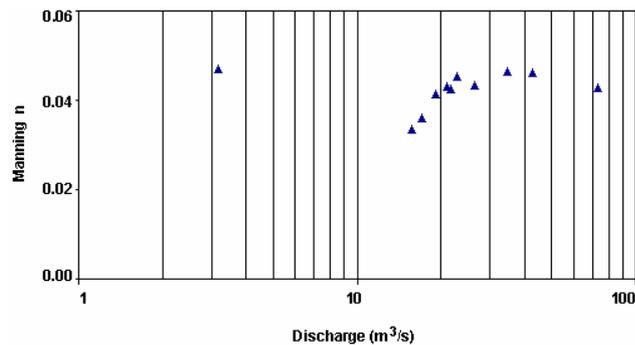
Abbildung 3.25: Böschung (krautiger Bewuchs):  $k_{St} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 38)

### 3.2.6 Untersuchungen von LAND & WATER AUSTRALIA

Land & Water Australia, Australian Government: An Australian Handbook of Stream Roughness Coefficients. Canberra: 2009.

#### Acheron River at Taggerty

<b>Range of Manning's n value</b>	
Channel	0.034 - 0.047
Estimated by	Direct measurement of hydraulic properties
Drainage Division	4
Basin	405
River	Acheron River
Nearest Stream Gauge	405209
Catchment Area	619 km <sup>2</sup>
Latitude	37.317°
Longitude	145.717°
Elevation	198.177 m
Average Daily Flow	800 ML
Channel Type	Gravel bed stream

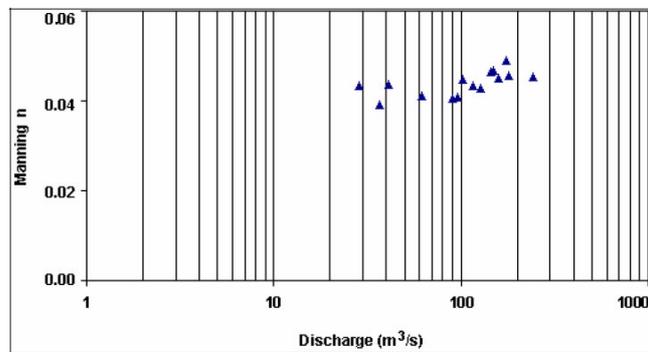


Discharge	ARI	Flow	Water Surface Slope	Friction Slope	Area	Expansion	Hydraulic Radius	Mean Velocity	Manning	Chezy	Darcy and Wiesbach
(m <sup>3</sup> /s)	(yr)	Percentile			(m <sup>2</sup> )	(%)	(m)	(m/s)	n	C	f
3.17	0.1	26.8%	0.00002	0.00003	28.21	51%	1.23	0.12	0.047	22.0	0.162
15.74	0.2	80.5%	0.00011	0.00012	38.68	39%	1.56	0.41	0.034	32.1	0.076
17.04	0.2	82.7%	0.00013	0.00015	39.60	38%	1.59	0.44	0.036	30.0	0.087
19.10	0.2	85.1%	0.00021	0.00023	40.56	36%	1.62	0.48	0.042	26.1	0.115
21.06	0.2	87.1%	0.00025	0.00026	42.16	34%	1.67	0.51	0.043	25.2	0.124
21.64	0.2	87.8%	0.00025	0.00026	42.65	34%	1.63	0.52	0.043	25.5	0.121
22.82	0.2	88.9%	0.00030	0.00032	43.53	33%	1.61	0.53	0.045	23.9	0.138
26.50	0.3	91.5%	0.00030	0.00032	46.70	34%	1.66	0.58	0.043	25.1	0.124
34.55	0.4	95.2%	0.00042	0.00045	52.66	33%	1.75	0.67	0.046	23.7	0.140
42.55	0.5	97.2%	0.00046	0.00049	59.84	37%	1.84	0.72	0.046	23.9	0.137
72.94	1.7	99.7%	0.00085	0.00090	81.94	43%	1.45	0.91	0.043	24.9	0.126

Abbildung 3.26: Acheron River at Taggerty:  $k_{SI}$ -Werte in Abhängigkeit vom Durchfluss zwischen  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $29 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Foto bei einem Durchfluss von  $5,16 \text{ m}^3/\text{s}$  (entnommen aus [LAND & WATER AUSTRALIA, 2009], S. 11 ff.)

**Mitta Mitta River at Hinnomunjie Bridge**

<b>Range of Manning's n value</b>	
Channel	0.039 - 0.049
Estimated by	Direct measurement of hydraulic properties
Drainage Division	4
Basin	401
River	Mitta Mitta River
Nearest Stream Gauge	401203
Catchment Area	1533 km <sup>2</sup>
Latitude	39.950°
Longitude	147.600°
Elevation	542.10 m
Average Daily Flow	1307 ML
Channel Type	Gravel bed stream



Discharge	ARI	Flow	Water Surface Slope	Friction Slope	Area	Expansion	Hydraulic Radius	Mean Velocity	Manning	Chezy	Darcy and Wiesbach
(m <sup>3</sup> /s)	(yr)	Percentile			(m <sup>2</sup> )	(%)	(m)	(m/s)	n	C	f
28.51	0.2	85.0%	0.00074	0.00077	40.10	38%	1.27	0.72	0.043	24.0	0.136
36.88	0.2	90.1%	0.00073	0.00076	44.65	32%	1.39	0.84	0.039	26.9	0.109
41.09	0.2	91.8%	0.00089	0.00091	47.49	24%	1.46	0.87	0.044	24.5	0.131
61.94	0.3	96.4%	0.00094	0.00096	58.42	16%	1.73	1.06	0.041	26.6	0.111
89.53	0.4	98.3%	0.00107	0.00108	69.81	10%	2.00	1.28	0.041	27.7	0.102
95.50	0.5	98.5%	0.00109	0.00111	72.75	8%	2.07	1.31	0.041	27.5	0.103
102.73	0.5	98.8%	0.00124	0.00125	78.00	4%	2.19	1.32	0.045	25.4	0.122
115.79	0.6	99.1%	0.00121	0.00122	82.61	4%	2.28	1.40	0.043	26.5	0.112
127.29	0.7	99.2%	0.00134	0.00134	84.61	2%	2.32	1.50	0.043	26.9	0.108
144.73	0.9	99.5%	0.00139	0.00138	96.14	0%	2.56	1.51	0.046	25.2	0.124
149.94	1.0	99.5%	0.00144	0.00143	97.95	-1%	2.59	1.53	0.047	25.0	0.125
157.94	1.1	99.6%	0.00139	0.00138	100.23	0%	2.63	1.58	0.045	26.0	0.116
174.63	1.4	99.7%	0.00158	0.00156	108.84	-4%	2.78	1.61	0.049	24.2	0.134
178.95	1.5	99.7%	0.00161	0.00158	104.35	-4%	2.71	1.72	0.046	25.9	0.117
242.63	3.5	99.9%	0.00202	0.00194	127.97	-8%	2.71	1.90	0.045	26.1	0.115

Abbildung 3.27: Mitta Mitta River at Hinnomunjie Bridge:  $k_{st}$ -Werte in Abhängigkeit vom Durchfluss zwischen  $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  und  $26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; Foto bei einem Durchfluss von  $1,68 \text{ m}^3/\text{s}$  (entnommen aus [LAND & WATER AUSTRALIA, 2009], S. 19 ff.)

### 3.2.7 Interpretation der vorliegenden Untersuchungen und Ergebnisse

Zu ergänzen wäre, dass der  $k_{St}$ -Wert nur für einen bestimmten Zustand, Fließtiefe bzw. Durchfluss dargestellt werden kann. Obige Abbildungen zeigen zumeist verschiedene  $k_{St}$ -Werte bei verschiedenen Abflüssen und Wassertiefen. Eine Angabe des Rauheitsbeiwertes ohne Angabe der Wassertiefe ist also genau genommen unzulässig.

Abbildung 3.25 und Abbildung 3.22 beispielsweise beschreiben Strickler-Beiwerte für die dargestellten Böschungen (Stauden bzw. Gras). Diese Darstellung ist genau genommen nicht zulässig, weil es einen Unterschied macht, ob beim rechten Foto die Überströmung des mit Gras bewachsenen erweiterten Abflussquerschnittes nur im cm-Bereich (sehr niedriger  $k_{St}$ -Wert) oder im m-Bereich (höherer  $k_{St}$ -Wert) vorliegt. Dieser Umstand wird bei den nachfolgenden Berechnungen und der Ergebnisdarstellung im Kapitel 4 ersichtlich.

Auch bei Abbildung 3.24 und Abbildung 3.23 ist nicht klar, für welchen Zustand und Wasserstand der angeführte Strickler-Beiwert gilt (die Angabe des  $k_{St}$ -Wertes kann also nur für den auf dem Foto dargestellten Zustand des Gerinnes, also Bewuchs, Wassertiefe,... gelten). Weil auch die Darstellung und Abmessungen eines Querprofils fehlen, können die Ergebnisse nur mit großen Unsicherheiten auf andere Fließquerschnitte übertragen werden.

### 3.2.8 Untersuchungen von PAUGAM und DELGYANSKA

Im Folgenden werden die Ergebnisse zweier Diplomarbeiten vorgestellt, die sich mit dem Thema der verschiedenen Berechnungsmethoden für naturnahe Gerinnequerschnitte einerseits und der Auswirkung von Böschungspflegemaßnahmen (Rückschnitt und Entfernung von Sträuchern, Verkräutung, sowie einhängende Äste) andererseits beschäftigten. Beide Diplomarbeiten basieren auf Untersuchungen von [CAYUELA, 2005]. Das damals untersuchte Gerinne war der naturnah ausgebauter Bewässerungskanal „Russbach“ (= Teil des Marchfeldkanalsystems in Niederösterreich, siehe Abbildung 3.28). Bei diesem Kanal kann die Zulaufmenge gezielt gesteuert werden.



Abbildung 3.28: Stark verwachsener Querschnitt des Russbaches im Herbst 2004 -  $k_{St}$ -Wert = **18 bis 21 m<sup>1/3</sup>/s** (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 43)

[PAUGAM, 2008] ermittelte im Herbst 2004 (vor dem Rückschnitt, siehe Abbildung 3.28) einen  $k_{St}$ -Wert von **18 bis 21 m<sup>1/3</sup>/s** (unter Berücksichtigung eines gewissen Vertrauensbereiches) bei einem Durchfluss von 10 m<sup>3</sup>/s. Im Frühjahr 2005 (nach dem Rückschnitt, siehe Abbildung 3.29) ergibt sich ein  $k_{St}$ -Wert von **28 bis 33 m<sup>1/3</sup>/s**. Den Querschnitt des Russbaches zeigt Abbildung 3.30.



Abbildung 3.29: Querschnitt des Russbaches im Frühjahr 2005 – auf Stock geschnittener Böschungsbe-  
wuchs -  $k_{St}$ -Wert = **28 bis 33 m<sup>1/3</sup>/s** (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 45)

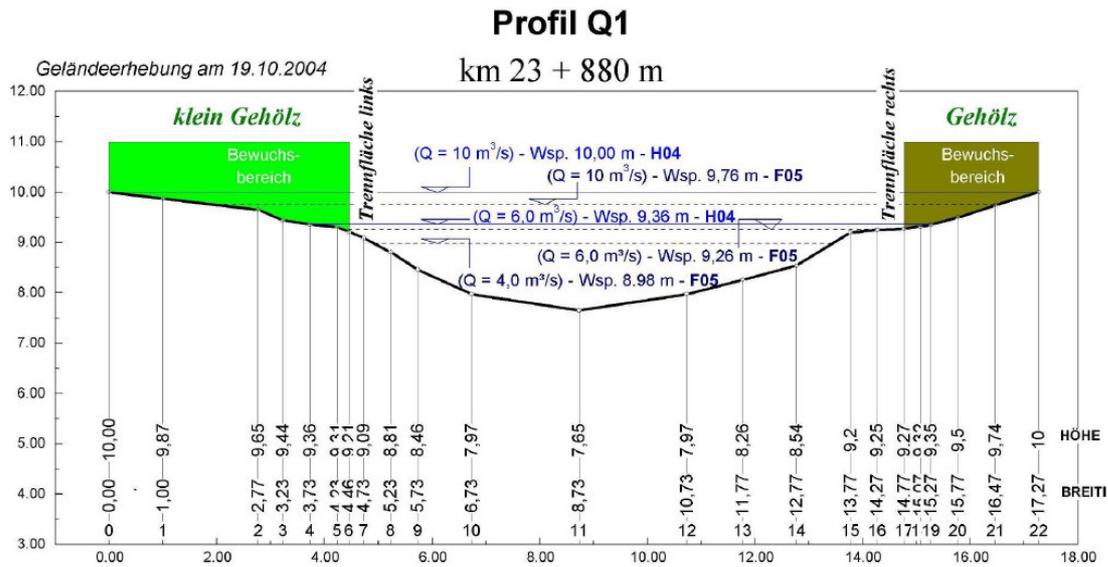


Abbildung 3.30: Querschnitt des Russbaches inkl. sich einstellender Wasserspiegel bei unterschiedlichen Durchflüssen (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 46)

Die Arbeit von [DELGYANSKA, 2012] befasst sich mit der Veränderung des Strickler-Beiwertes bzw. der hydraulischen Leistungsfähigkeit infolge Rückschnitts des Böschungsbewuchses und Entfernen einhängender Äste. Dazu wurde ein physikalisches Modell am Wasserbaulabor der TU Wien gebaut, das mithilfe von Naturdaten kalibriert wurde. Sechs Versuchsserien (VS) wurden durchgeführt (siehe Abbildung 3.31).



Basisversuch ohne Bewuchs (Versuchsserie VS1)



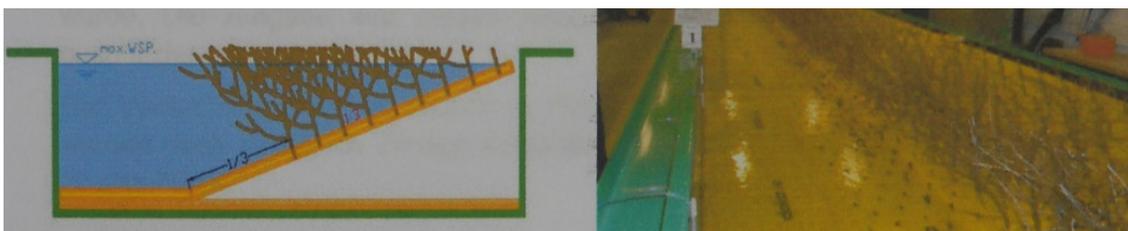
Vollständig bestockte Gerinneböschung (Versuchsserie VS2)



Vollständig bestockte Gerinneböschung mit einhängenden Ästen (Versuchsserie VS3)



Vollständig bestockte Gerinneböschung – vertikale Trennfläche (Versuchsserie VS4)



Gerinneböschung mit um 1/3 reduzierter Bestockung (Versuchsserie VS5)



Gerinneböschung mit um 2/3 reduzierter Bestockung (Versuchsserie VS6)

Abbildung 3.31: Durchgeführte Versuchsserien VS (entnommen aus [DELGYANSKA, 2012], S. 59 f.)

Als „Urzustand“ wurde der stark verwachsene Russbach (vor dem Rückschnitt im Herbst 2004 - siehe Abbildung 3.28) herangezogen (entspricht den Versuchsergebnissen VS2 – vollständig bestockte Gerinneböschung und VS3 – vollständig bestockte Gerinneböschung mit einhängenden Ästen). Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (Auswirkungen [%] des Rückschnittes von Böschungsbewuchs auf den Durchfluss  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] bei gleichem Wasserstand):

- Rückschnitt der einhängenden Äste:  $Q$  um 4,8 % größer bei gleichem Wasserstand (Vergleich von VS2 mit VS3)
- Rückschnitt der schrägen Bewuchsränder:  $Q$  um 13,2 % größer bei gleichem Wasserstand (Vergleich von VS4 mit VS2)
- Rückschnitt von einhängenden Ästen und der schrägen Bewuchsränder:  $Q$  um 18,0 % größer bei gleichem Wasserstand (Vergleich von VS4 mit VS3)
- Rückschnitt um 1/3 der Bestockung auf der Gerinneböschung:  $Q$  um 80,7 % größer bei gleichem Wasserstand (Vergleich von VS5 mit VS2)
- Rückschnitt um 2/3 der Bestockung auf der Gerinneböschung:  $Q$  um 191 % größer bei gleichem Wasserstand (Vergleich von VS6 mit VS2)

Abbildung 3.32 und Abbildung 3.33 verdeutlichen oben beschriebene Umstände.

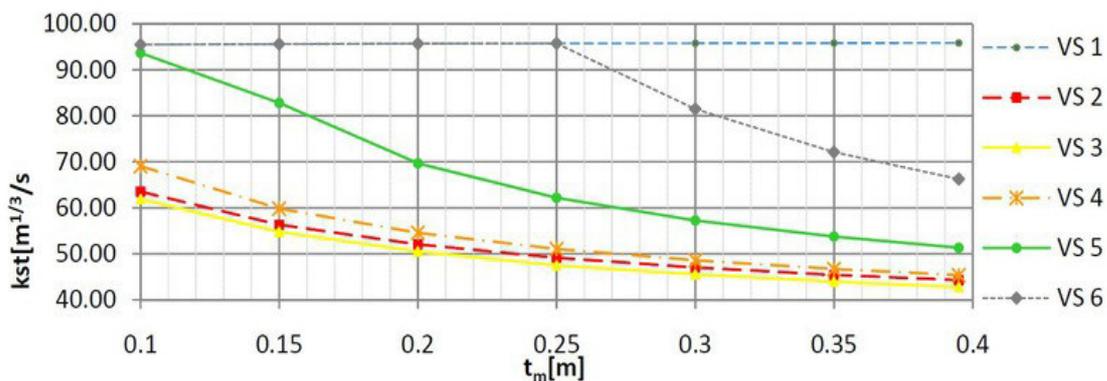


Abbildung 3.32: Gegenüberstellung der Beziehungen zwischen Wasserstand und Strickler-Beiwert der durchgeführten Versuchsserien VS (entnommen aus [DELGYANSKA, 2012], S. 73)

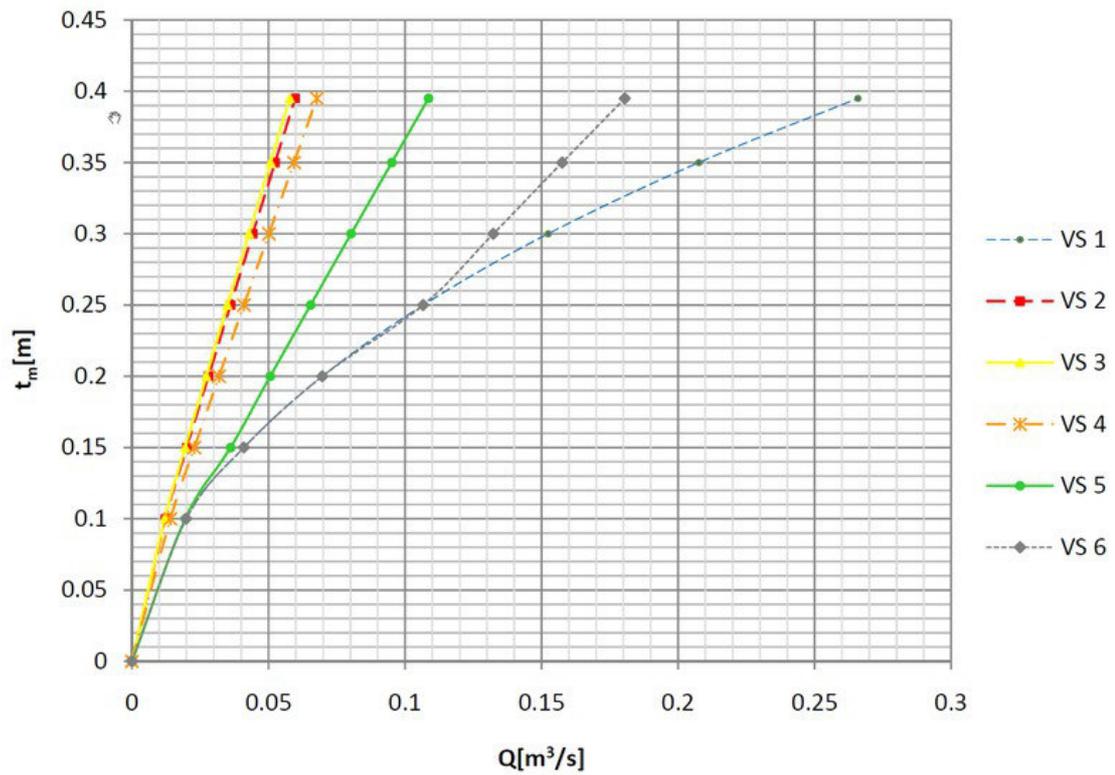


Abbildung 3.33: Gegenüberstellung der Wasserstands-Abflussbeziehungen der durchgeführten Versuchsserien VS (entnommen aus [DELGYANSKA, 2012], S. 72)

#### 4 **Ermittlung von Rauheitsbeiwerten für ausgewählte Fließquerschnitte**

Im Folgenden wurden bei sechs Pegelstellen Strickler-Beiwerte ermittelt.

Zum einen wurden dabei vom hydrografischen Dienst Burgenland (siehe auch Internetplattform [WASSERPORTAL BGLD. 2014]) bzw. vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Internetplattform „ehyd“) über viele Jahre aufgezeichnete Daten für die weiteren Berechnungen bezogen.

Andererseits wurde bei vier ausgewählten Pegelstellen neben einer **Vermessung des Sohlgefälles** mit einem Theodolit die **Fließgeschwindigkeit** des jeweiligen Baches abgeschätzt. Es wurden verschiedene Schwimmkörper ins Wasser geworfen und nach Erreichen einer konstanten Geschwindigkeit des Körpers die Zeit über eine Wegstrecke von 50 m gemessen.

Bei einem **Vergleich** der gemessenen Fließgeschwindigkeiten und der ermittelten Fließgeschwindigkeiten kann festgehalten werden, dass die Werte geringfügig voneinander abweichen (die aus den Durchflussdaten und dem durchflossenen Querschnitt ermittelten Geschwindigkeiten vom Wasserportal Burgenland liegen unter den gemessenen).

Diese **Pegelstellen** wurden näher untersucht, auch das **Sohlgefälle und die Fließgeschwindigkeit** wurden **für einen Abflusszustand** ermittelt (siehe Abbildung 4.1):

- Pinka bei den Pegeln Oberwart und Pinkafeld
- Zickenbach (Oberwart) beim Pegel Siget i. d. Wart
- Tauchenbach beim Pegel Altschlaining

Folgende **Arbeitsschritte** wurden durchgeführt:

- Fotografische Aufnahme des Gerinnes im Bereich der Pegelstellen
- Vermessung des Sohlgefälles bei vier ausgewählten Pegeln (siehe Abbildung 4.3)
- Messung der Fließgeschwindigkeit bei vier ausgewählten Pegeln
- Anhand gemessener und vom Wasserportal Burgenland (siehe [WASSERPORTAL BGLD. 2014]) bzw. ehyd (siehe [EHYD, 2014]) bezogener Daten bei den Pegelstellen: Berechnung der Widerstandsbeiwerte ( $k_{St}$ -Werte)
- Abschätzung der Sohlrauheit und Berechnung der Böschungsrauheit
- Darstellung der Ergebnisse für untersuchte Querprofile der Flüsse

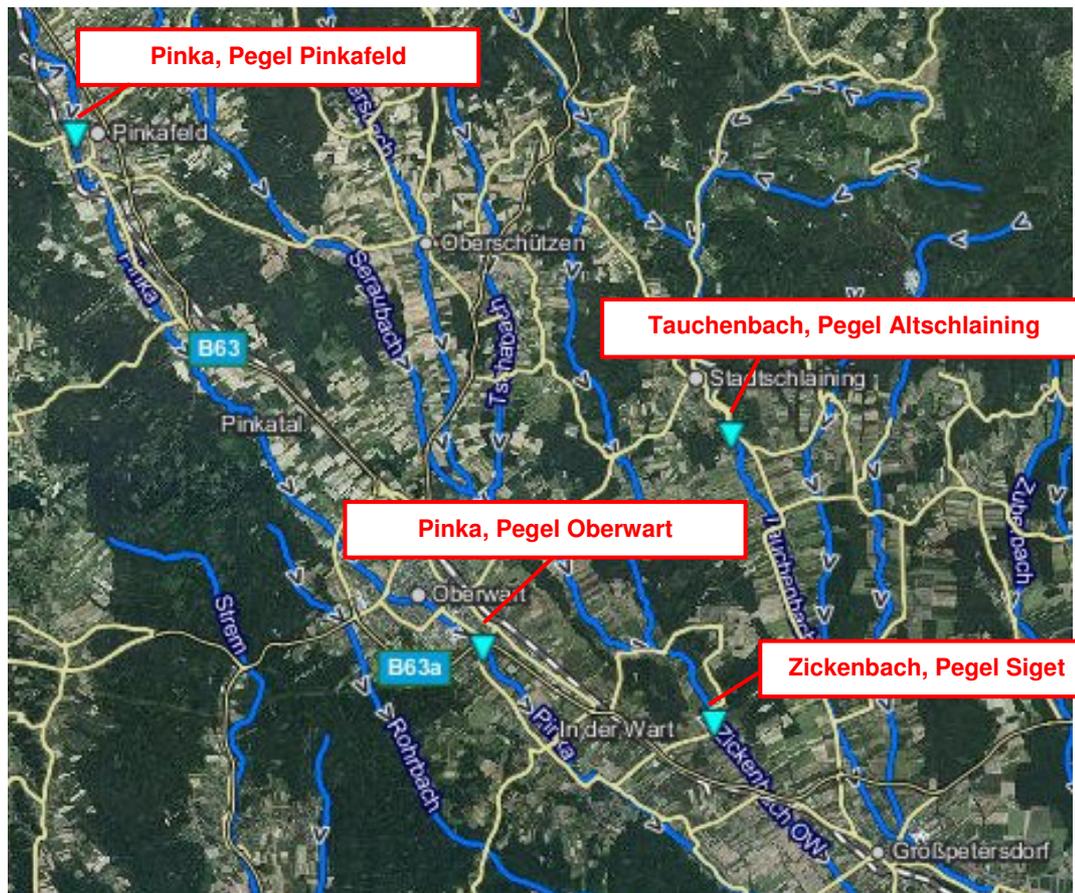


Abbildung 4.1: Untersuchte Pegelstellen (entnommen aus [EHYD, 2014], Ergänzungen vom Autor hinzugefügt)

Zwei **weitere Pegelstellen** wurden untersucht, bei denen das Sohlgefälle und die Fließgeschwindigkeit nicht ermittelt wurden, um auch Strickler-Beiwerte für stärker bewachsene Querschnitte angeben zu können (siehe Abbildung 4.2; außerdem wurde hier lediglich eine Berechnung des „Gesamt-  $k_{St}$ -Wertes vorgenommen, da genauere Aufnahmen der Sohle und somit eine Bestimmung der Sohlrauheit fehlen):

- Raab beim Pegel in Neumarkt
- Lafnitz beim Pegel in Eltendorf



Abbildung 4.2: Weiters untersuchte Pegelstellen (entnommen aus [EHYD, 2014], Ergänzungen vom Autor hinzugefügt)



Abbildung 4.3: Vermessung des Sohlgefälles am 23. 01. 2015 (Pegel Pinka in Oberwart)

#### 4.1 Pinka bei Pinkafeld

- Hydrometrische Station: Pinka (Fluss-km: 75,85; Pinkafeld)
- orographische Einzugsgebietsgröße: 134,1 km<sup>2</sup>
- Pegelnullpunkt: 384,05 m ü.A.
- Sohlgefälle: 5 ‰ (kleiner Absturz der Sohle im Bereich der Brücke ca. 30 m flussabwärts des Pegels, dieser wird jedoch nicht berücksichtigt)
- Gerinnebreite an der Wasseroberfläche (bei MQ): 7,1 m, Sohlbreite: ca. 6,0 m
- Abflussgerinne: Trapezprofil mit Sohle aus Kies und größeren Wasserbausteinen; Böschungen mit Gras bewachsen; im Nahbereich des Pegels und 30 m flussabwärts des Pegels im Bereich der Brücke: Wasserbausteine am Böschungsfuß und im Sohlbereich

Tabelle 4.1: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])

Jährlichkeit des Abflusses	Q95%	MQ	HQ1	HQ5	HQ10	HQ30	HQ100
Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,34	1,0	17	40	54	83	128

Abbildung 4.4 zeigt die Pinka beim Pegel in Pinkafeld, Blick gegen die Fließrichtung, Abbildung 4.5 in Fließrichtung.



Abbildung 4.4: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahme datum: 06. 10. 2014



Abbildung 4.5: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Blick in Fließrichtung; Aufnahme datum: 06. 10. 2014

Aufgrund von Sohlunregelmäßigkeiten kommt es immer wieder zu Querströmungen und Energiedissipation (zu sehen an der verstärkten Wellenbildung). Die Fotos wurden von der Brücke aus geschossen, unterhalb befindet sich auch ein leichter Absturz der Sohle, dieser wird jedoch bei der Berechnung des Sohlgefälles nicht berücksichtigt.

Die **äquivalente Sandrauheit der Sohle** wurde mithilfe von Tabelle 2.2 und in Kapitel 3 angegebener Tabellenwerte abgeschätzt. Dabei ergibt sich für  $k_{S, \text{Sohle}}$  ein Wert von 10 cm. Abbildung 4.6 zeigt die Gewässersohle der Pinka bei Pinkafeld. Obwohl große Wasserbausteine und Flussskies mit einem Durchmesser von deutlich mehr als 10 cm Durchmesser zu sehen sind, ergibt sich aufgrund der hydraulisch günstigen Lage der Steine parallel zur Strömungsrichtung ein verhältnismäßig geringer Wert für die äquivalente Sandrauheit.



Abbildung 4.6: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Gewässersohle (Gewässerbite = 6,5 m ca., Flussschotter und größere Wasserbausteine, die jedoch aufgrund der Lage einen geringen Fließwiderstand ergeben) – Annahme  $k_S = 10$  cm

Weil die Minima der Durchflüsse für diese Arbeit wenig relevant sind (die Punktwolke im Bereich zwischen einem Wasserspiegel von 110 cm bis 130 cm ist für die Erstellung eines Pegelschlüssels nicht dienlich), werden in weiterer Folge jeweils nur die Monatsmaxima der Durchflüsse bzw. Wasserstände berücksichtigt.

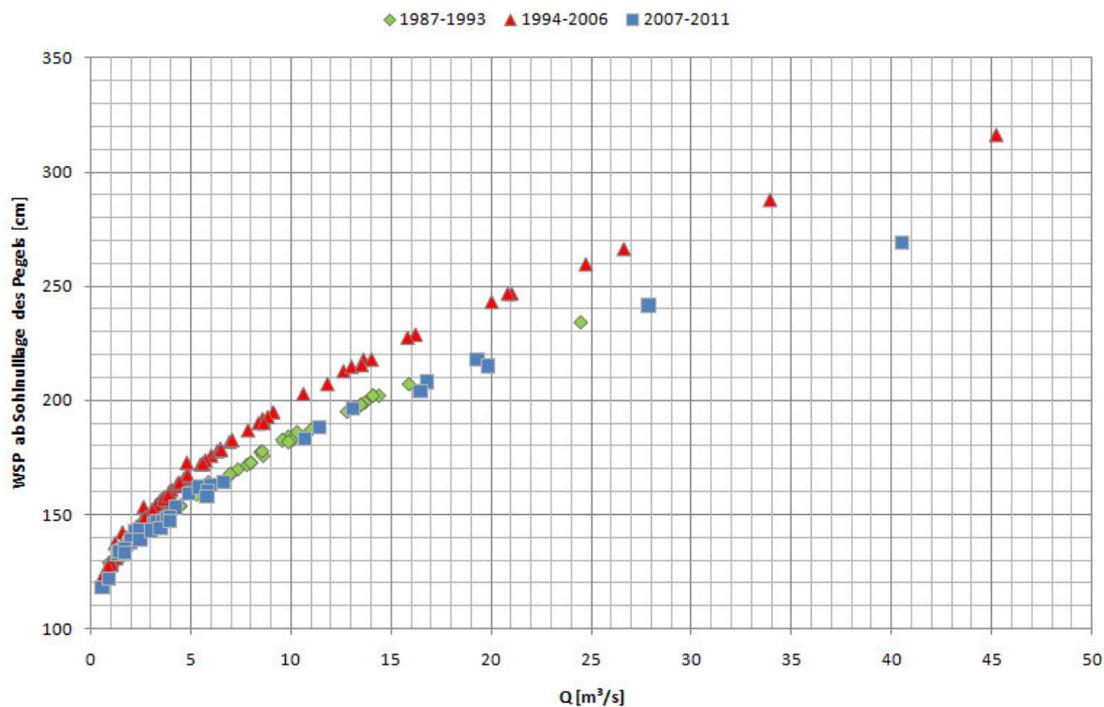


Abbildung 4.7: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Durchflusswerte (Monatsmaxima jeweils im Zeitraum von 1987-2010) in Abhängigkeit vom Wasserstand

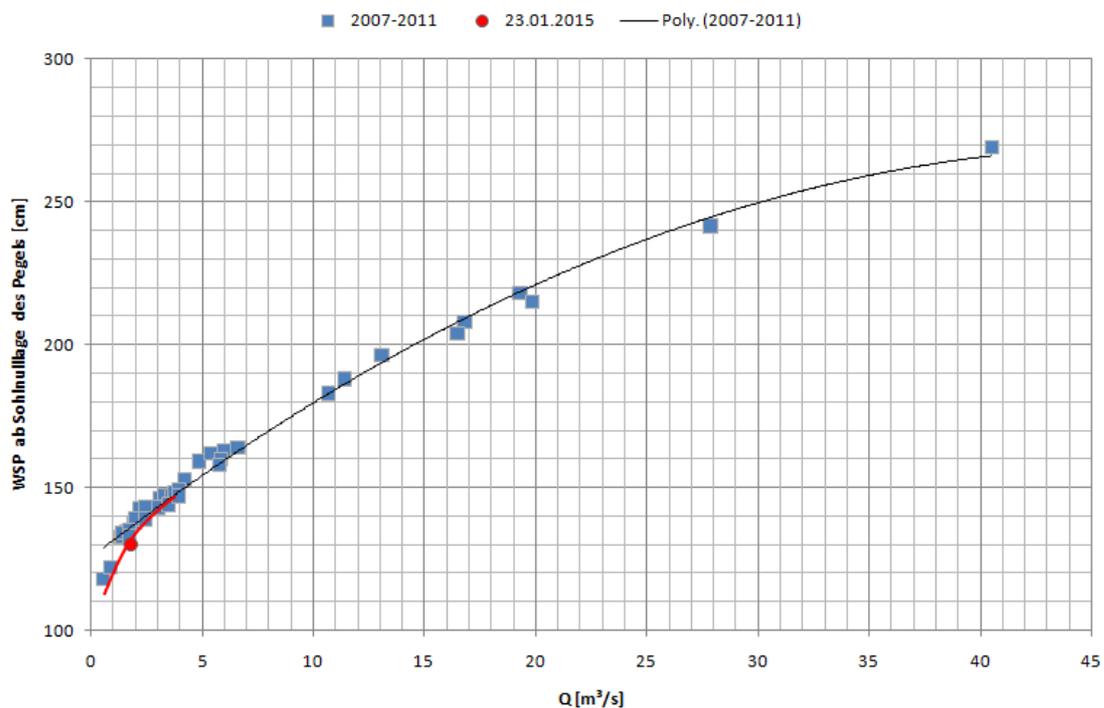


Abbildung 4.8: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Durchflusswerte (Monatsmaxima jeweils im Zeitraum von 2007-2011) in Abhängigkeit vom Wasserstand

Abbildung 4.7 zeigt die **Durchflüsse in Abhängigkeit vom Wasserstand** für die Pinka in Pinkafeld. Deutlich ist ein „oberer“ und ein „unterer“ Verlauf der Punkte zu erkennen, wahrscheinlich resultiert dieser aus einer Veränderung des Pegelschlüssels

über die Zeit (Korrekturen des Pegelschlüssels wegen neuerer Geschwindigkeitsmessungen z.B.). Interessanterweise passen die Werte zwischen 1987 und 1993 mit den Werten zwischen 2007 und 2011 zusammen. Der obere Strang ergibt sich also ausschließlich aus den Werten zwischen 1994 und 2006.

Aus diesem Grund werden nur die **Monatsmaxima der Durchflüsse zwischen 2007 – 2011** (zu diesem Zeitpunkt die letztmöglich abrufbaren Daten vom Internetportal ehyd) für die weiteren Berechnungen herangezogen (siehe Abbildung 4.8).

Der **rote Punkt** in dieser Abbildung resultiert aus der durchgeführten Fließgeschwindigkeitsmessung und Rückrechnung des Durchflusses. Die Abweichungen werden bei den nachfolgenden Berechnungen dargestellt. Die rote Kurve stellt den korrigierten Pegelschlüssel dar.

Die folgenden **Tabellen** zeigen die **durchgeführten Berechnungen**, vorher sind zugehörige Zeichenerklärungen und Formeln angeführt. In Tabelle 4.2 sind die Strickler-Beiwerte (berechnet mithilfe der GMS-Formel) inkl. aller notwendigen Daten aufgelistet. Weil speziell bei Niederwasserverhältnissen die Genauigkeit der berechneten **Rauheitsbeiwerte** mit der **GMS-Gleichung** nicht gegeben ist (siehe dazu Abbildung 2.10), wird im Folgenden auch mithilfe der **DW-Gleichung** ein Strickler-Beiwert errechnet. Den letzten Teil der Tabelle stellt die Ermittlung des Strickler-Beiwertes nach **COWAN** dar.

grau schraffierte Zellen ... Eingabefelder

grün dargestellte Werte (in Spalte „PS korr.“, also korrigierte Pegelschlüssel-Werte) ... WSP, Q, und  $k_{St}$  – Werte, die aufgrund der durchgeführten Messungen korrigiert wurden (v.a. bei Nieder- und Mittelwasser)

rot dargestellte Werte ... nicht korrigierte Pegelschlüssel-Werte und Ergebnisse bei Nieder- und Mittelwasser (WSP, Q, und  $k_{St}$  – Werte)

WSP ... Wasserspiegel lt. Pegelschlüssel [cm]

Q ... Durchfluss [ $m^3/s$ ] lt. Pegelschlüssel

A ... durchflossener Querschnitt [ $m^2$ ]

$v_{urspr.}$  ... Fließgeschwindigkeit vor Berücksichtigung des Randeinflusses von Sohle und Böschungen ( $=Q/A$ )

$A_{Abzug}$  ... Fläche [ $m^2$ ], wo  $v = 0$  m/s ist – bei eigenen Geschwindigkeitsmessungen berücksichtigt (Annahme: Fließquerschnitt verringert sich um  $k_{S,Sohle}/4$  im Bereich der Sohle und  $k_{S,Sohle}/2$  im Bereich der Böschungen)

$v_{Mittel}$  ... tatsächliche, mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s] =  $v_{neu} = v_{urspr.} - (v_{urspr.} * \frac{A_{Abzug}}{A})$

$Q_{tatsächlich}$  ... tatsächlicher Durchfluss [ $m^3/s$ ] ( $= v_{Mittel} * A$ )

$I_E$  ... Energieliniengefälle = Sohlgefälle aus Vermessung

$U$  ... benetzter Umfang [m]

$B_0$  ... Gewässerbreite an der Wasseroberfläche [m]

$R_{Hy}$  ... hydraulischer Radius [m] ( $=A/U$ )

$y$  ... mittlere Wassertiefe (entspricht  $\bar{h} = A/B_0$ )

$k_{St,GMS}$  ... Strickler-Beiwert nach der empirischen Fließformel nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER [ $m^{1/3}/s$ ]

$k_{S,ges}/4 \cdot R_{Hy}$  ... Faktor zur Überprüfung der Genauigkeit der GMS-Formel (bei Werten  $> 0,12$  weisen die Ergebnisse nicht mehr zu vernachlässigende Ungenauigkeiten nach GMS auf (besonders bei geringen WT) – eine Berechnung des Rauheitsbeiwertes mit der Formel nach DW ist notwendig, siehe dazu Abbildung 2.10)

$h_{Gr}$  ... Grenzwassertiefe [m] zur Überprüfung der Strömungsverhältnisse ( $y > h_{Gr}$  – strömender Abfluss – immer so)

$v_{Gr}$  ... Grenzgeschwindigkeit [m/s] zur Überprüfung der Strömungsverhältnisse ( $v > v_{Gr}$  – strömender Abfluss – immer so)

$Fr$  ... Froudezahl zur Überprüfung der Strömungsverhältnisse ( $Fr < 1$  - strömender Abfluss – immer so)

$y$  ... mittlere Wassertiefe (entspricht  $\bar{h} = A/B_0$ )

$Re$  ... Reynolds-Zahl zur Charakterisierung des Fließzustandes ( $Re = \frac{v_m \cdot 4 \cdot R_{Hy}}{\nu}$ ) (immer turbulente Fließzustände bei den vorliegenden, offenen Gerinnen)

$B_0/y$  ... Verhältnis zur Bestimmung des Formbeiwertes  $f$  (wenn  $B_0/y > 25 \rightarrow f = 0,74$ , ansonsten ist  $f = 0,83$ )

$f_{Trapez/R.}$  ... Formbeiwert

$\lambda$  ... Widerstandsbeiwert; aus Umformung von Formel (2-9) berechnet:  $v = \left(\frac{8 \cdot g}{\lambda}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot R_{Hy}^{\frac{1}{2}} \cdot I_0^{\frac{1}{2}}$

[4], links =  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$ ; [4], rechts =  $-2,035 \cdot \log\left(\frac{v}{4,51 \cdot f \cdot \sqrt{g \cdot R_{Hy} \cdot I_E}} + \frac{k_S}{14,84 \cdot f \cdot R_{Hy}}\right)$  (siehe auch Formel (2-11))

Fehler = [4], links - [4], rechts (muss gleich 0 sein –  $k_{S,ges.,iterat.}$  wird so lange variiert, bis die Differenz zwischen linker und rechter Seite 0 ist)  $\rightarrow k_{S,ges.,iterat.}$

$k_{S,ges.,iterat.}$  ... äquivalente Sandrauheit für das gesamte Profil [m]

$k_{St,C+W}$  ... Strickler-Beiwert für das gesamte Profil [ $m^{1/3}/s$ ] nach DARCY-WEISBACH und COLEBROOK und WHITE; nach Formel (2-18):  $k_{St} = \frac{17,72}{R_{Hy}^{\frac{1}{6}}} \cdot \log\left(\frac{14,84 \cdot R_{Hy}}{k_S}\right)$

$\Delta k_{St}$  ... Differenz zwischen Strickler-Beiwerten nach GMS und DW

Formel nach [COWAN, 1956] (siehe auch Formel (2-25)):  $n_i$  ... Einflussfaktoren,  $m_5$  ... Mäandrierungsgrad:  $n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5$ .

Tabelle 4.2: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Strickler-Beiwerte

	23.01.2015		PS korr.	mit Pegelschlüssel-Werten				
WSP =	130	cm	120	120	155	180	220	267
Q =	2.07	m <sup>3</sup> /s	0.90	0.70	5.00	9.60	20.00	40.00
A =	2.00	m <sup>2</sup>	1.28	1.28	3.97	6.17	10.42	16.67
V <sub>urspr.</sub> =	1.0	m/s	0.7	0.5	1.3	1.6	1.9	2.4
A <sub>Abzug</sub> =	0.20	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V <sub>mittel</sub> =	0.9	m/s	0.7	0.5	1.3	1.6	1.9	2.4
Q <sub>tatsächlich</sub> =	1.9	m <sup>3</sup> /s	0.9	0.7	5.0	9.6	20.0	40.0
I <sub>E</sub> =	0.005		0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
U =	7.55	m	7.09	7.09	8.66	9.86	12.39	15.49
B <sub>0</sub> =	7.38	m	6.98	6.98	8.33	9.40	11.80	14.73
R <sub>Hy</sub> =	0.26	m	0.18	0.18	0.46	0.63	0.84	1.08
y =	0.27	m	0.18	0.18	0.48	0.66	0.88	1.13
k <sub>St,GMS</sub> =	32.1	m <sup>1/3</sup> /s	31.3	24.4	29.9	30.1	30.5	32.3
k <sub>s,ges</sub> /4*R <sub>Hy</sub> =	0.10		0.14	0.26	0.11	0.09	0.07	0.05
h <sub>Gr</sub> =	0.19	m	0.12	0.10	0.33	0.47	0.66	0.91
v <sub>Gr</sub> =	1.35	m/s	1.08	0.99	1.81	2.16	2.55	2.99
Fr =	0.57		0.53	0.41	0.58	0.61	0.65	0.72
y =	0.27	m	0.18	0.18	0.48	0.66	0.88	1.13
Re =	8.17E+05		4.20E+05	3.26E+05	1.91E+06	3.22E+06	5.34E+06	8.54E+06
B <sub>0</sub> / y =	27.30		38.21	38.21	17.46	14.32	13.37	13.02
f <sub>Trapez/R.</sub> =	0.74		0.74	0.74	0.83	0.83	0.83	0.83
λ =	0.119		0.142	0.234	0.113	0.101	0.090	0.073
k <sub>s,ges,iterat.</sub> =	0.108	m	0.097	0.190	0.196	0.221	0.236	0.204
[4], links =	2.905		2.658	2.067	2.969	3.140	3.342	3.693
[4], rechts =	2.911		2.659	2.068	2.969	3.140	3.343	3.688
Fehler =	-0.01		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
k <sub>St,cAW</sub> =	34.5	m <sup>1/3</sup> /s	33.9	27.1	31.1	31.1	31.4	33.1
Δk <sub>St</sub> =	2.42	m <sup>1/3</sup> /s	2.58	2.69	1.12	1.05	0.97	0.83
n <sub>0</sub> =	0.026		0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
n <sub>1</sub> =	0.001		0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000
n <sub>2</sub> =	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
n <sub>3</sub> =	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
n <sub>4</sub> =	0.002		0.002	0.002	0.004	0.004	0.004	0.003
m <sub>5</sub> =	1.050		1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050
k <sub>St,cNwan</sub> =	33.4	m <sup>1/3</sup> /s	32.3	32.3	31.2	31.2	31.7	32.8

In Tabelle 4.2 ist zu erkennen, dass der **Unterschied** zwischen dem hydraulischen Radius **R<sub>Hy</sub>** und der **Wassertiefe y** vernachlässigbar klein ist. Für die Berechnung des k<sub>St</sub>-Wertes wird jedenfalls R<sub>Hy</sub> verwendet. Dieser Unterschied würde sich nur bei sehr kompakten Gerinnequerschnitten auswirken.

Der **Unterschied** zwischen den **Strickler-Beiwerten** aus gemessener und berechneter Fließgeschwindigkeit ist jedoch zu erkennen. Beispielsweise ergibt sich der k<sub>St</sub>-Wert bei einem WSP ab Sohnullage des Pegels von 120 cm (also einer mittleren Wassertiefe von 18 cm) **mit einer Korrektur des Pegelschlüssels** (unter Einbeziehung

der gemessenen Fließgeschwindigkeiten) zu **33,9 m<sup>1/3</sup>/s**, ohne Korrektur zu **27,1 m<sup>1/3</sup>/s**. Zur Erstellung der nachfolgenden Ergebnis-Grafiken werden also die durchgeführten Fließgeschwindigkeitsmessungen berücksichtigt.

Für ausgewählte Durchflüsse bzw. Wasserstände wurde der **Rauheitsbeiwert** ( $k_{St}$ -Wert) also mittels der empirischen Formel nach **GAUCKLER-MANNING-STRICKLER** und dem universellen Fließgesetz nach **DARCY-Weißbach** (inkl. Ermittlung des Widerstandes nach **COLEBROOK und WHITE**) berechnet. Außerdem wurde mit Hilfe des Verfahrens nach **INDLEKOFER** aus dem Jahr **2003** und einem überschlägigen Verfahren, basierend auf **EINSTEIN** und **HORTEN**, der Strickler-Beiwert von Sohle und Böschung bei unterschiedlichen Wasserständen bzw. Durchflüssen ermittelt (siehe Tabelle 4.3). Alle Berechnungen und Abbildungen folgen auf den nächsten Seiten. Ausgangspunkt ist ein gewählter Wert für die Sohlrauheit  $k_{S,Sohle}$  von 10 cm.

rot dargestellte Werte in der Spalte ... nicht korrigierte Pegelschlüssel-Werte und Ergebnisse bei Nieder- und Mittelwasser (WSP, Q, und  $k_{St}$  – Werte)

grün schraffierte Zellen ... Werte ändern sich, bis der Fehler  $\Delta k_{St}$  (= Differenz zwischen Vorgabe- Strickler-Beiwert aus Berechnung nach DW und neu berechnetem Strickler-Beiwert  $\leq 0,01$  ist)

grau schraffierte Zellen ... Eingabefelder für das Verfahren, basierend auf EINSTEIN und HORTEN (alle anderen Definitionen wurden bereits getroffen)

$k_{S,S}$  bzw.  $k_{S,Sohle}$  und  $k_{S,Bö}$  ... äquivalente Sandrauheit der Sohle (=10 cm) und der Böschung (Anfangs nicht bekannt)

$R_{hy,i}$  ... (i = Sohle, Böschung) hydraulische Radien der Sohle bzw. Böschung [m]

$A_i$  ... Teilfläche der Sohle bzw. der Böschung [m]

$U_i$  ... benetzter Umfang der Sohle bzw. der Böschung [m]

$\kappa$  ... Korrekturfaktor für die Umrechnung von  $k_{S,i}$  auf  $k_{St,i}$  ( $\kappa = \frac{\log\left(\frac{14,84}{\frac{k_S}{R_{Hy}}}\right)^{1,467}}{\frac{k_S}{R_{Hy}}}$ )

$k_{St,i}$  ... (i = **Gesamt**, **Sohle**, **Böschung**) Strickler-Beiwert [m<sup>1/3</sup>/s]

$k_{St,Soll}$  bzw.  $k_{St,ges.,Vorgabe}$  ... Vorgabe- Strickler-Beiwert, um auf einen Strickler-Beiwert für die Böschung rückrechnen zu können

$k_{St,Bö.,lt.}$  ... durch Iteration ermittelter Strickler-Beiwert für die Böschung (nach Formel (2-24)):

$$k_{St,ges.,Vorgabe} = \frac{U^{2/3} * k_{St,Sohle} * k_{St,Böschung}}{\left( U_{Sohle} * k_{St,Böschung}^{3/2} + U_{Böschung} * k_{St,Sohle}^{3/2} \right)^{2/3}}$$

Tabelle 4.3: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Strickler-Beiwerte – Gesamt, für die Sohle und für die Böschung, rot dargestellte Werte in der Spalte: Zahlenwerte ohne Korrektur des Pegelschlüssels (die grün schraffierten Zellen werden bei der Iteration verändert, bis die Summe der Teilflächen gleich der Gesamtfläche entspricht; siehe Abbildung 2.13)

$k_{s,s}/R_{hy,s} =$	0.39		0.55	0.73	0.28	0.21	0.16	0.12	1. ITERATION
$k_{s,bö}/R_{hy,bö} =$	0.48		0.49	2.59	0.80	0.60	0.41	0.24	
$R_{hy,sohle} =$	0.26	m	0.18	0.14	0.36	0.48	0.64	0.87	
$R_{hy,böschung} =$	0.29	m	0.17	0.41	0.68	0.85	1.03	1.21	
$A_{sohle} =$	1.54	m <sup>2</sup>	1.09	0.83	2.18	2.89	3.83	5.20	
$A_{böschung} =$	0.45	m <sup>2</sup>	0.19	0.45	1.79	3.28	6.59	11.47	
$A_{indlek.os} =$	2.00	m <sup>2</sup>	1.28	1.28	3.97	6.17	10.42	16.67	
$A_{soll} =$	2.00	m <sup>2</sup>	1.28	1.28	3.97	6.17	10.42	16.67	
Fehler =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$K_{sohle} =$	1.637		2.112	2.707	1.344	1.182	1.067	0.981	
$K_{böschung} =$	1.898		1.936	20.270	2.991	2.279	1.699	1.263	
$k_{st,s} =$	35.2	m <sup>1/3</sup> /s	33.7	32.3	36.3	37.1	37.8	38.3	
$k_{s,bö,it.} =$	0.14	m	0.08	1.06	0.54	0.51	0.42	0.29	
$k_{st,bö,it.} =$	32.4	m <sup>1/3</sup> /s	35.2	15.6	24.0	25.3	27.5	30.7	
$k_{st,ges} =$	34.5	m <sup>1/3</sup> /s	33.9	27.1	31.1	31.1	31.4	33.2	
$k_{st,soll} =$	34.5	m <sup>1/3</sup> /s	33.9	27.1	31.1	31.1	31.4	33.1	
$\Delta k_{st} =$	0.01	m <sup>1/3</sup> /s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	
$k_{st,s,neu} =$	35.2	m <sup>1/3</sup> /s	33.7	32.3	36.3	37.1	37.8	38.3	
$R_{hy,sohle,neu} =$	0.26	m	0.18	0.14	0.36	0.48	0.64	0.87	
$A_{sohle,neu} =$	1.54	m <sup>2</sup>	1.09	0.83	2.18	2.88	3.83	5.20	
$R_{hy,bö,neu} =$	0.29	m	0.17	0.41	0.68	0.85	1.03	1.21	
$A_{böschung,neu} =$	0.45	m <sup>2</sup>	0.19	0.45	1.79	3.29	6.58	11.46	
$A_{indlek.os,neu} =$	1.99	m <sup>2</sup>	1.27	1.27	3.97	6.17	10.42	16.66	
$A_{soll} =$	2.00	m <sup>2</sup>	1.28	1.28	3.97	6.17	10.42	16.67	
Fehler =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	
$K_{sohle} =$	1.637		2.112	2.711	1.344	1.183	1.067	0.981	
$K_{böschung} =$	1.901		1.936	20.179	2.991	2.278	1.700	1.263	
$k_{s,bö,it.} =$	0.14	m	0.08	1.07	0.54	0.51	0.42	0.29	
$k_{st,bö,it.} =$	32.4	m <sup>1/3</sup> /s	35.2	15.6	24.0	25.3	27.5	30.7	
$k_{st,ges} =$	34.6	m <sup>1/3</sup> /s	33.9	27.1	31.1	31.1	31.4	33.1	
$k_{st,soll} =$	34.5	m <sup>1/3</sup> /s	33.9	27.1	31.1	31.1	31.4	33.1	
$\Delta k_{st} =$	0.01	m <sup>1/3</sup> /s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	
$U_{sohle} =$	6.0	m	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	
$U_{bö} =$	1.6	m	1.1	1.1	2.7	3.9	6.4	9.5	
$k_{st,sohle} =$	35.2	m <sup>1/3</sup> /s	33.7	32.3	36.3	37.1	37.8	38.3	
$k_{st,bö,it.} =$	32.4	m <sup>1/3</sup> /s	35.2	15.6	24.0	25.3	27.5	30.7	
$k_{st,ges,vorg} =$	34.5	m <sup>1/3</sup> /s	33.9	27.1	31.1	31.1	31.4	33.1	
Fehler =	0.00	m <sup>1/3</sup> /s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	

Abbildung 4.9 zeigt den Verlauf der  $k_{st}$ -Werte und der Wasserspiegel in Abhängigkeit vom Durchfluss. Dabei wurden zur Erstellung des Pegelschlüssels die Maximalwerte der Durchflüsse in jedem Monat (Zeitraum 2007 – 2011) herangezogen („Pegelschlüssel-Werte und Ergebnisse“). Bei Nieder- und Mittelwasser wurden die Werte

entsprechend den eigenen Fließgeschwindigkeitsmessungen angepasst („korrigierte [korr.] Werte“).

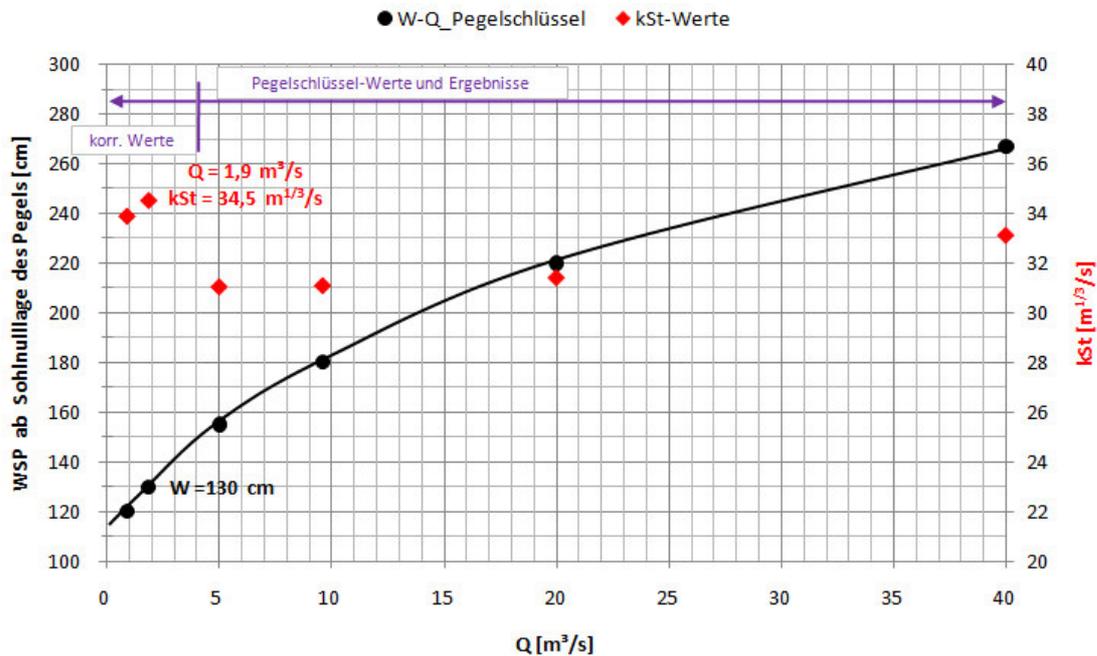


Abbildung 4.9: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Verlauf des  $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss (beschriftete Werte: Durchfluss, Wasserstand und  $k_{St}$ -Wert am Tag der Vermessung)

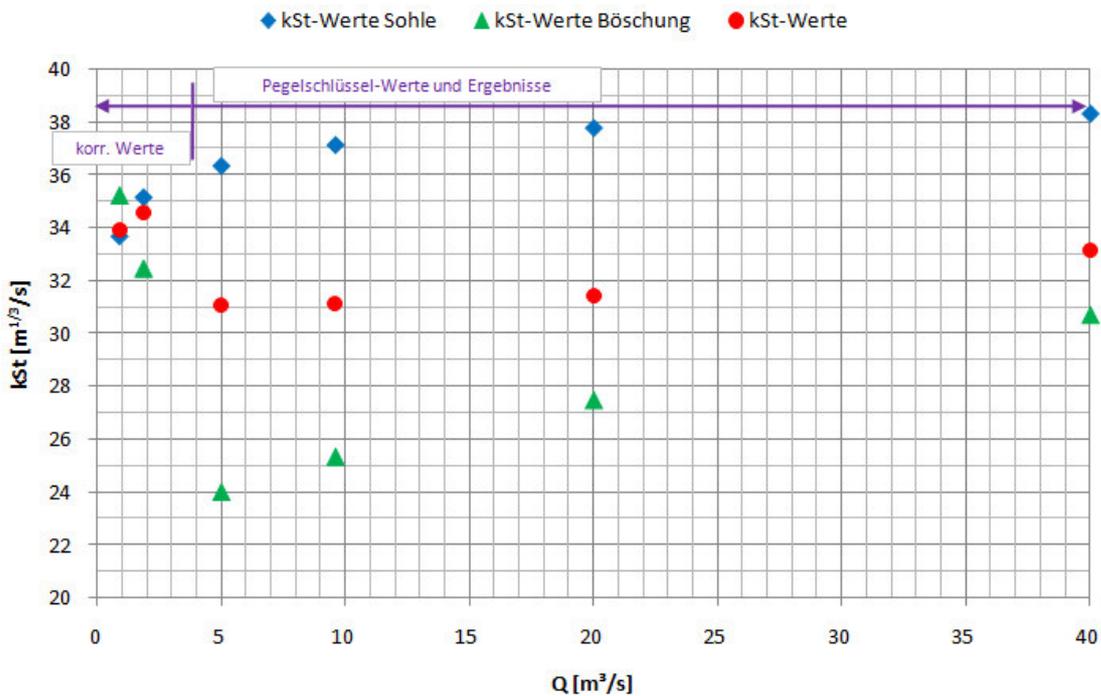


Abbildung 4.10: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Verlauf der  $k_{St}$ -Werte (über den Abfluss)

Aus Abbildung 4.10 geht hervor, dass sich bei niedrigen und mittleren Durchflüssen ein eher hoher  $k_{St}$ -Wert ergibt. Der Grund dafür ist vor allem der, dass die Sohlrau-

heit größeren Einfluss hat als die Böschungrauheit. Der Strickler-Beiwert für die Sohle und der Gesamt- Strickler-Beiwert liegen also nahe beieinander.

Bei größeren Durchflüssen und Wasserstände kommt es zu einem Abfallen des  $k_{St}$ -Wertes. Es wird dann nämlich vor allem der eher unregelmäßige und stärker bewachsene Bereich beim Böschungsfuß durch- bzw. überströmt.

Ab einem Durchfluss, der in etwa einem HQ1 entspricht, ändert sich der  $k_{St}$ -Wert der Sohle nicht mehr wesentlich. Wegen der großflächigeren Durchströmung des Gerinnequerschnittes hat die Böschung bei zunehmendem Abfluss bzw. zunehmender Wassertiefe größeren Einfluss als die Sohle auf den Gesamtwiderstand. Der Gesamt-Strickler-Beiwert steigt mit zunehmendem Abfluss wieder geringfügig an.

Abbildung 4.11 zeigt schematisch das Querprofil der Pinka in Pinkafeld. Die mittleren Wassertiefen sind in Abhängigkeit des Durchflusses dargestellt und die berechneten Strickler-Beiwerte angegeben.

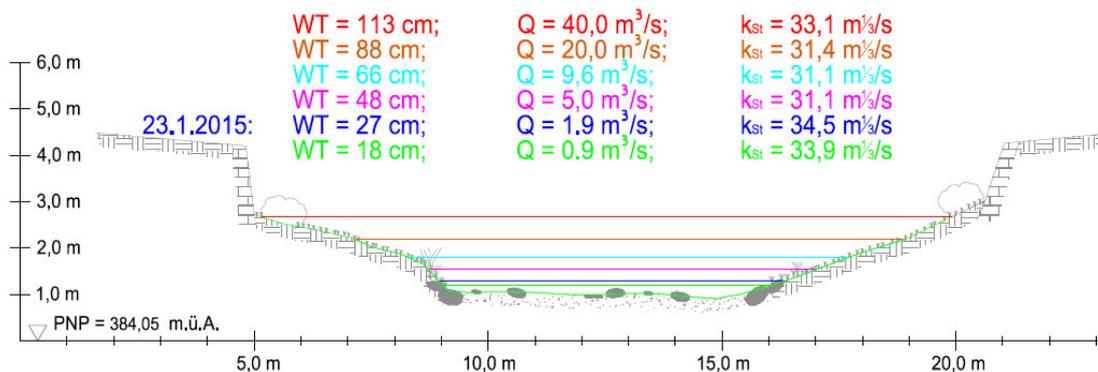


Abbildung 4.11: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der  $k_{St}$  - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q

## 4.2 Pinka bei Oberwart

- Hydrometrische Station: Pinka (Fluss-km: 61,50; Oberwart)
- orographische Einzugsgebietsgröße: 171,7 km<sup>2</sup>
- Pegelnullpunkt: 302,59 m ü.A.
- Sohlgefälle: 4 ‰
- Gerinnebreite an der Wasseroberfläche (bei MQ): 6,5 m, Sohlbreite: ca. 5,5 m
- Abflussgerinne: Trapezprofil mit Sohle aus Kies und größeren Wasserbausteinen; Böschungen mit Gras bewachsen

Tabelle 4.4: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])

Jährlichkeit des Abflusses	Q95%	MQ	HQ1	HQ5	HQ10	HQ30	HQ100
Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,38	1,21	20	36	42	72	75

Abbildung 4.12 zeigt die Pinka beim Pegel in Oberwart, Blick gegen die Fließrichtung, Abbildung 4.13 in Fließrichtung.



Abbildung 4.12: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014



Abbildung 4.13: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014

Die Fotos wurden von einer Brücke aus gemacht. Aufgrund von Sohlunregelmäßigkeiten kommt es immer wieder zu Querströmungen und Energiedissipation (zu sehen an der verstärkten Wellenbildung). Die **äquivalente Sandrauheit der Sohle** wurde mithilfe von Tabelle 2.2 und den in Kapitel 3 angegebenen Tabellenwerten abgeschätzt.

Abbildung 4.14 zeigt die Gewässersohle der Pinka bei Oberwart, hier wird  $k_{S, \text{Sohle}}$  mit 8 cm gewählt. Im Gegensatz zur Sohle der Pinka in Pinkafeld ist der Anteil an großen Wasserbausteinen geringer (im Vergleich:  $k_{S, \text{Sohle}} \text{ Pinkafeld} = 10 \text{ cm}$ ).



Abbildung 4.14: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Gewässersohle, Breite des Fotos = 4 m ca. (v.a. Kies, vereinzelt größere Wasserbausteine) – Annahme  $k_S = 8 \text{ cm}$

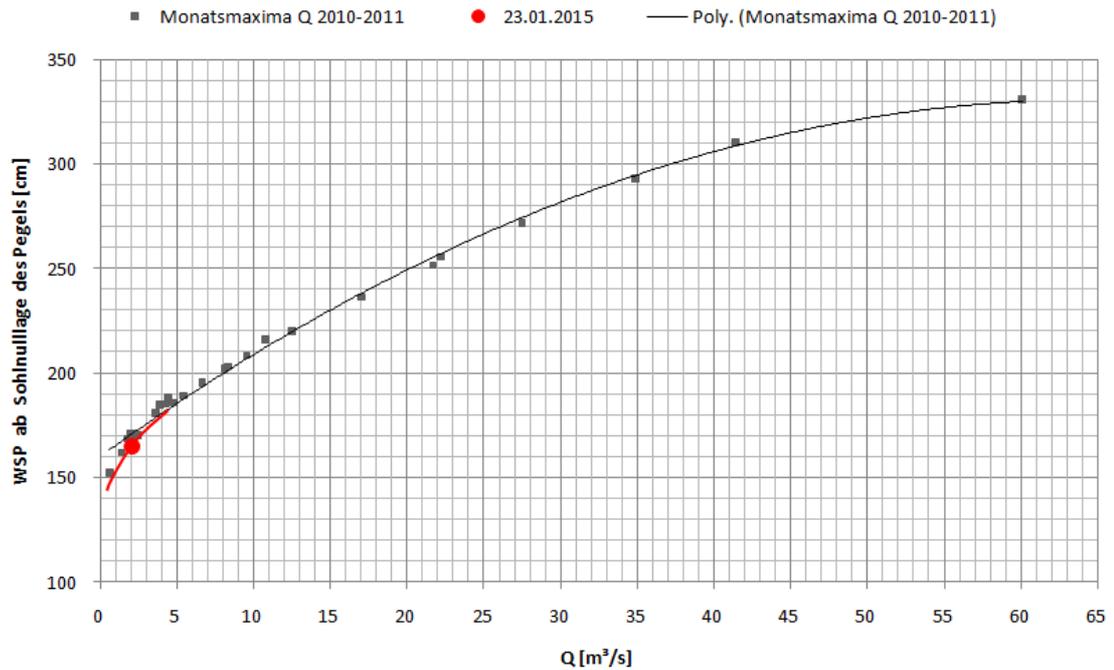


Tabelle 4.5: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Strickler-Beiwerte

	23.01.2015		$l_{E, \text{mittel}}$	PS korr.	mit Pegelschlüssel-Werten			
WSP =	162	cm	155	155	186	211	250	305
Q =	1.8	m <sup>3</sup> /s	1.0	1.0	5.0	10.0	20.0	40.0
A =	1.74	m <sup>2</sup>	1.29	1.29	3.44	5.44	9.37	19.06
$v_{\text{urspr.}}$ =	1.1	m/s	0.8	0.8	1.5	1.8	2.1	2.1
$A_{\text{Abzug}}$ =	0.18	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$v_{\text{mittel}}$ =	0.9	m/s	0.8	0.8	1.5	1.8	2.1	2.1
$Q_{\text{tatsächlich}}$ =	1.6	m <sup>3</sup> /s	1.0	1.0	5.0	10.0	20.0	40.0
$l_E$ =	0.004		0.006	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
U =	6.69	m	6.35	6.35	7.73	8.90	12.94	22.36
$B_0$ =	6.59	m	6.28	6.28	7.49	8.50	12.42	21.75
$R_{Hy}$ =	0.26	m	0.20	0.20	0.44	0.61	0.72	0.85
y =	0.26	m	0.21	0.21	0.46	0.64	0.75	0.88
$k_{S, \text{GMS}}$ =	34.8	m <sup>1/3</sup> /s	28.8	33.6	37.6	38.5	39.9	35.2
$k_{S, \text{ges.}}/4 \cdot R_{Hy}$ =	0.09		0.16	0.10	0.05	0.03	0.02	0.04
$h_{Gr}$ =	0.18	m	0.14	0.14	0.36	0.52	0.64	0.70
$v_{Gr}$ =	1.35	m/s	1.16	1.16	1.87	2.26	2.51	2.62
Fr =	0.58		0.54	0.54	0.69	0.73	0.78	0.72
y =	0.26	m	0.21	0.21	0.46	0.64	0.75	0.88
Re =	8.11E+05		5.21E+05	5.21E+05	2.14E+06	3.72E+06	5.11E+06	5.91E+06
$B_0 / y$ =	24.90		30.50	30.50	16.30	13.29	16.46	24.82
$f_{\text{Trappez/R.}}$ =	0.83		0.74	0.74	0.83	0.83	0.83	0.83
$\lambda$ =	0.102		0.161	0.118	0.073	0.062	0.055	0.067
$k_{S, \text{ges., iterat.}}$ =	0.092	m	0.133	0.082	0.081	0.080	0.071	0.130
[4], links =	3.137		2.495	2.914	3.713	4.007	4.269	3.869
[4], rechts =	3.141		2.496	2.917	3.720	4.016	4.270	3.878
Fehler =	0.00		0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.01
$k_{St, \text{C+W}}$ =	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	31.4	36.1	38.7	39.5	40.8	36.1
$\Delta k_{St}$ =	1.26	m <sup>1/3</sup> /s	2.55	2.49	1.08	0.99	0.85	0.96
$n_0$ =	0.025		0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
$n_1$ =	0.002		0.003	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
$n_2$ =	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$n_3$ =	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
$n_4$ =	0.000		0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002
$m_5$ =	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$k_{St, \text{Cowan}}$ =	36.5	m <sup>1/3</sup> /s	35.7	35.7	38.5	39.2	40.0	35.7

In Tabelle 4.5 ist zu erkennen, dass der **Unterschied** zwischen dem hydraulischen Radius  $R_{Hy}$  und der **Wassertiefe**  $y$  vernachlässigbar klein ist. Für die Berechnung des  $k_{St}$ -Wertes wird jedenfalls  $R_{Hy}$  verwendet. Dieser Unterschied würde sich nur bei sehr kompakten Gerinnequerschnitten auswirken.

Jetzt wird die Differenz der  $k_{St}$ -Werte infolge eines veränderten Sohlgefälles festgestellt. Der **Unterschied** zwischen den **Strickler-Beiwerten** aus dem gemessenen und berechneten **Sohlgefälle** ist deutlich zu erkennen. Beispielsweise ergibt sich der  $k_{St}$ -Wert bei einem **gemessenen Sohlgefälle** von 4 ‰ und einem WSP ab Sohnulllage

des Pegels von 155 cm (also einer mittleren Wassertiefe von 21 cm) zu  $36,0 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , mit einem berechneten Sohlgefälle von 6 ‰ zu  $31,4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

Für ausgewählte Durchflüsse bzw. Wasserstände wurde also der **Rauheitsbeiwert** ( $k_{St}$ -Wert) mittels der empirischen Formel nach **GAUCKLER-MANNING-STRICKLER** und dem universellen Fließgesetz nach **DARCY-Weißbach** (inkl. Ermittlung des Widerstandes nach **COLEBROOK und WHITE**) berechnet. Außerdem wurde mit Hilfe des Verfahrens nach **INDLEKOFER** aus dem Jahr **2003** und einem überschlägigen Verfahren, basierend auf **EINSTEIN** und **HORTEN**, der Strickler-Beiwert von Sohle und Böschung bei unterschiedlichen Wasserständen bzw. Durchflüssen ermittelt (siehe Tabelle 4.6). Alle Berechnungen und Abbildungen folgen auf den nächsten Seiten. Ausgangspunkt ist ein gewählter Wert für die Sohlrauheit  $k_{S,Sohle}$  von 8 cm.

Tabelle 4.6: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Strickler-Beiwerte **Gesamt**, für die **Sohle** und für die **Böschung**, **rot dargestellte Werte in der Spalte**: Zahlenwerte bei einem Sohlgefälle von 6 ‰ (die grün schraffierten Zellen werden bei der Iteration verändert, bis die Summe der Teilflächen gleich der Gesamtläche entspricht; siehe Abbildung 2.13)

$k_{s,s}/R_{hy,s} =$	0.32		0.48	0.40	0.18	0.13	0.11	0.11	1. ITERATION
$k_{s,böi}/R_{hy,bö} =$	0.50		1.74	0.46	0.19	0.13	0.09	0.17	
$R_{hy,sohle} =$	0.25	m	0.17	0.20	0.44	0.61	0.75	0.74	
$R_{hy,böschung} =$	0.32	m	0.43	0.22	0.45	0.61	0.71	0.89	
$A_{sohle} =$	1.37	m <sup>2</sup>	0.92	1.11	2.43	3.36	4.12	4.05	
$A_{böschung} =$	0.38	m <sup>2</sup>	0.37	0.19	1.00	2.08	5.25	15.01	
$A_{indlek.03} =$	1.74	m <sup>2</sup>	1.29	1.29	3.44	5.44	9.37	19.06	
$A_{soil} =$	1.74	m <sup>2</sup>	1.29	1.29	3.44	5.44	9.37	19.06	
Fehler =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$K_{sohle} =$	1.460		1.884	1.660	1.121	1.013	0.964	0.967	
$K_{böschung} =$	1.951		8.794	1.824	1.138	1.012	0.936	1.094	
$k_{st,s} =$	37.2	m <sup>1/3</sup> /s	35.7	36.4	38.9	39.5	39.9	39.8	
$k_{s,bö,it} =$	0.16	m	0.76	0.10	0.08	0.08	0.07	0.15	
$k_{st,bö,it} =$	31.6	m <sup>1/3</sup> /s	19.0	34.5	38.4	39.5	41.5	35.1	
$k_{st,ges} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	31.4	36.1	38.7	39.5	40.8	36.1	
$k_{st,soil} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	31.4	36.1	38.7	39.5	40.8	36.1	
$\Delta k_{st} =$	0.00	m <sup>1/3</sup> /s	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
$k_{st,s,neu} =$	37.2	m <sup>1/3</sup> /s	35.6	36.4	38.9	39.5	39.9	39.8	2. ITERATION
$R_{hy,sohle,neu} =$	0.25	m	0.17	0.20	0.44	0.61	0.75	0.74	
$A_{sohle,neu} =$	1.37	m <sup>2</sup>	0.92	1.11	2.43	3.36	4.12	4.05	
$R_{hy,bö,neu} =$	0.32	m	0.43	0.22	0.45	0.61	0.71	0.89	
$A_{böschung,neu} =$	0.38	m <sup>2</sup>	0.37	0.19	1.00	2.07	5.25	15.01	
$A_{indlek.03,neu} =$	1.74	m <sup>2</sup>	1.29	1.29	3.44	5.43	9.37	19.06	
$A_{soil} =$	1.74	m <sup>2</sup>	1.29	1.29	3.44	5.44	9.37	19.06	
Fehler =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$K_{sohle} =$	1.460		1.884	1.659	1.121	1.013	0.964	0.967	
$K_{böschung} =$	1.953		8.835	1.831	1.138	1.013	0.936	1.094	
$k_{s,bö,it} =$	0.16	m	0.76	0.10	0.08	0.08	0.07	0.15	
$k_{st,bö,it} =$	31.6	m <sup>1/3</sup> /s	18.9	34.5	38.4	39.5	41.5	35.1	
$k_{st,ges} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	31.4	36.1	38.7	39.5	40.8	36.2	
$k_{st,soil} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	31.4	36.1	38.7	39.5	40.8	36.1	
$\Delta k_{st} =$	0.00	m <sup>1/3</sup> /s	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	
$U_{sohle} =$	5.5	m	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	
$U_{bö} =$	1.2	m	0.9	0.9	2.2	3.4	7.4	16.9	
$k_{st,sohle} =$	37.2	m <sup>1/3</sup> /s	35.6	36.4	38.9	39.5	39.9	39.8	
$k_{st,bö,it} =$	31.6	m <sup>1/3</sup> /s	18.9	34.5	38.4	39.5	41.5	35.1	
$k_{st,ges,vorg} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	31.4	36.1	38.7	39.5	40.8	36.1	
Fehler =	0.00	m <sup>1/3</sup> /s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Abbildung 4.16 zeigt den Verlauf der  $k_{st}$ -Werte und der Wasserspiegel in Abhängigkeit vom Durchfluss. Dabei wurden zur Erstellung des Pegelschlüssels die Maximalwerte der Durchflüsse in jedem Monat (Zeitraum 2010 – 2011) herangezogen (siehe Abbildung 4.15). Bei Nieder- und Mittelwasser wurden die Fließgeschwindigkeits-

messungen berücksichtigt bzw. die Pegelschlüsselwerte dementsprechend angepasst (dieser Unterschied wurde bereits beim Pegel in Pinkafeld herausgearbeitet).

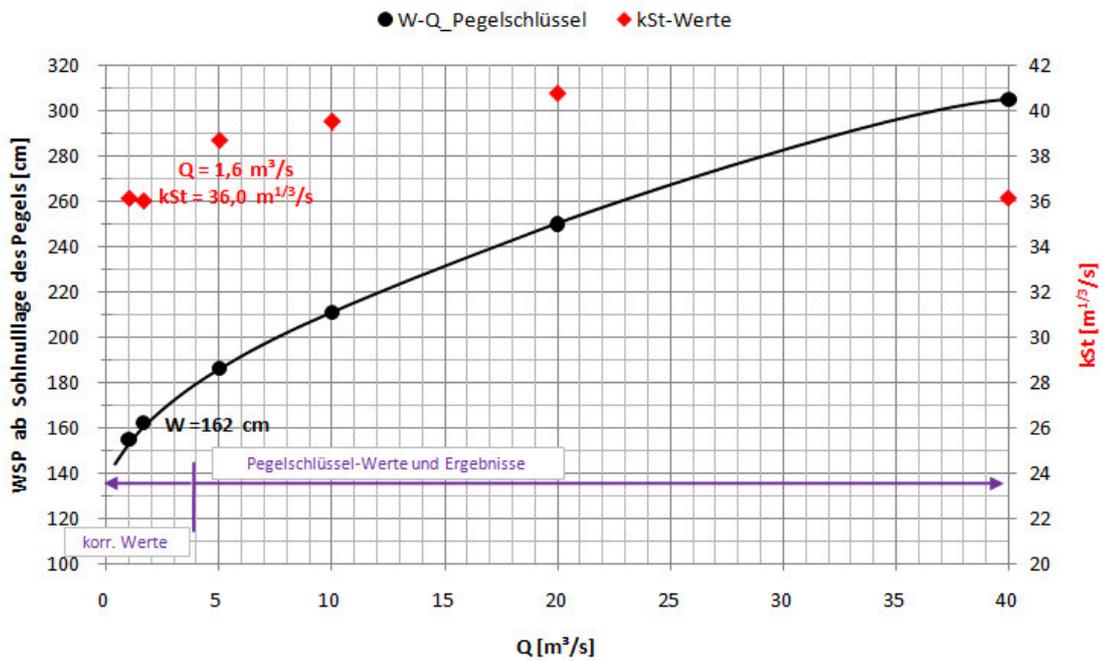


Abbildung 4.16: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Verlauf des  $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss (beschriftete Werte: Durchfluss, Wasserstand und  $k_{St}$ -Wert am Tag der Vermessung)

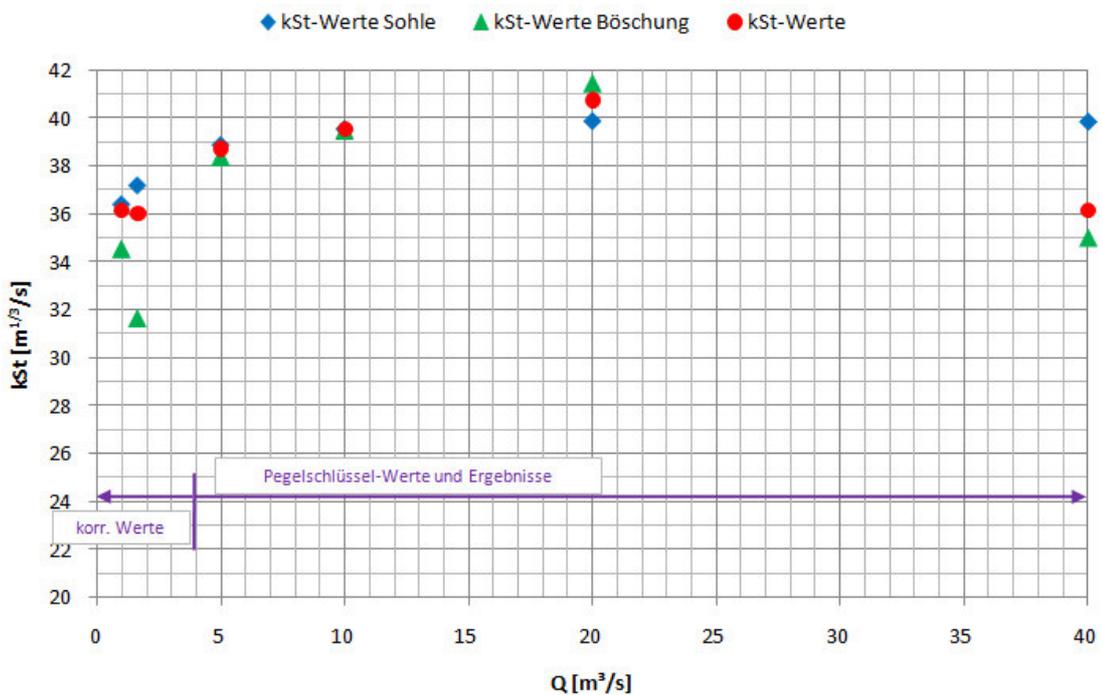


Abbildung 4.17: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Verlauf der  $k_{St}$ -Werte (über den Abfluss)

Abbildung 4.17 zeigt den Verlauf der  $k_{St}$ -Werte für unterschiedliche Durchflüsse. Bei Niederwasser stellt sich ein eher kleiner  $k_{St}$ -Wert (für allem für die Böschung) ein. Mit zunehmendem Abfluss steigen die Strickler-Beiwerte an, dies hängt damit zusammen, dass sich aufgrund größerer Wassertiefen Sohlunebenheiten und Böschungsunregelmäßigkeiten nicht mehr so stark auswirken.

Ab einem Durchfluss, der in etwa einem HQ1 entspricht, ändert sich der  $k_{St}$ -Wert der Sohle nicht mehr wesentlich. Wegen der großflächigeren Durchströmung des Gerinnequerschnittes hat die Böschung bei zunehmendem Abfluss bzw. zunehmender Wassertiefe größeren Einfluss als die Sohle auf den Gesamtwiderstand.

Bei Durchflüssen, die über den Werten eines HQ1 liegen, fällt der  $k_{St}$ -Wert wieder ab. Das hängt damit zusammen, dass aufgrund des gegliederten Querschnittes auch Energie in Form von Wirbelbildungen vernichtet wird und außerdem die Böschung nur mit geringer Wassertiefe überströmt wird (siehe Kapitel 2.8.2).

Abbildung 4.18 zeigt schematisch das Querprofil der Pinka in Oberwart. Die mittleren Wassertiefen sind in Abhängigkeit des Durchflusses dargestellt und die berechneten Strickler-Beiwerte angegeben.

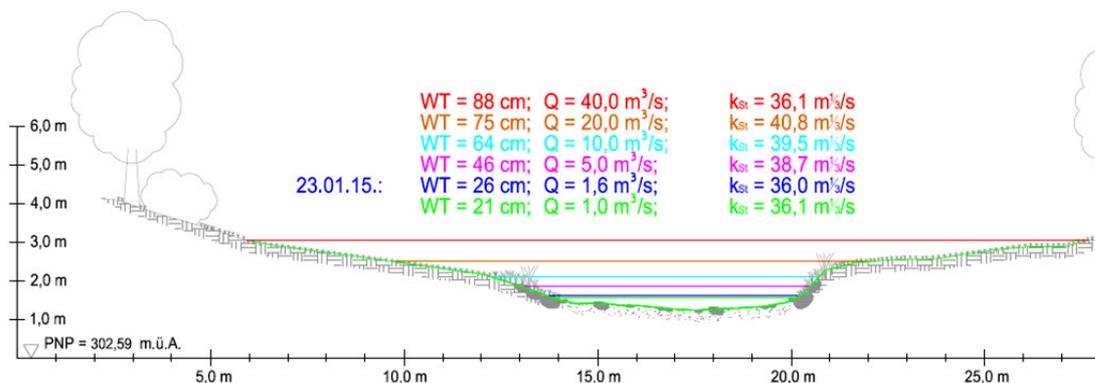


Abbildung 4.18: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der  $k_{St}$  - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q

### 4.3 Zickenbach (Oberwart) bei Siget in der Wart

- Hydrometrische Station: Zickenbach (Fluss-km: 9,75; Siget in der Wart)
- orographische Einzugsgebietsgröße: 118,8 km<sup>2</sup>
- Pegelnullpunkt: 280,98 m ü.A.
- Sohlgefälle: 2 ‰
- Gerinnebreite an der Wasseroberfläche (bei MQ): 3,9 m, Sohlbreite: ca. 3,3 m
- Abflussgerinne: Trapezprofil mit Sohle aus Sand und Kies, Böschungen mit Gras bewachsen

Tabelle 4.7: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])

Jährlichkeit des Abflusses	Q95%	MQ	HQ1	HQ5	HQ10	HQ30	HQ100
Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,09	0,43	9	24	39	72	108

Abbildung 4.19 zeigt die Zickenbach beim Pegel in Siget in der Wart, Blick gegen die Fließrichtung, Abbildung 4.20 in Fließrichtung.



Abbildung 4.19: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014



Abbildung 4.20: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014

Nachfolgend wird die **äquivalente Sandrauheit der Sohle** abgeschätzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Sohlmaterial in etwa der Körnungslinie von Kiessand (siehe Abbildung 4.21) entspricht.

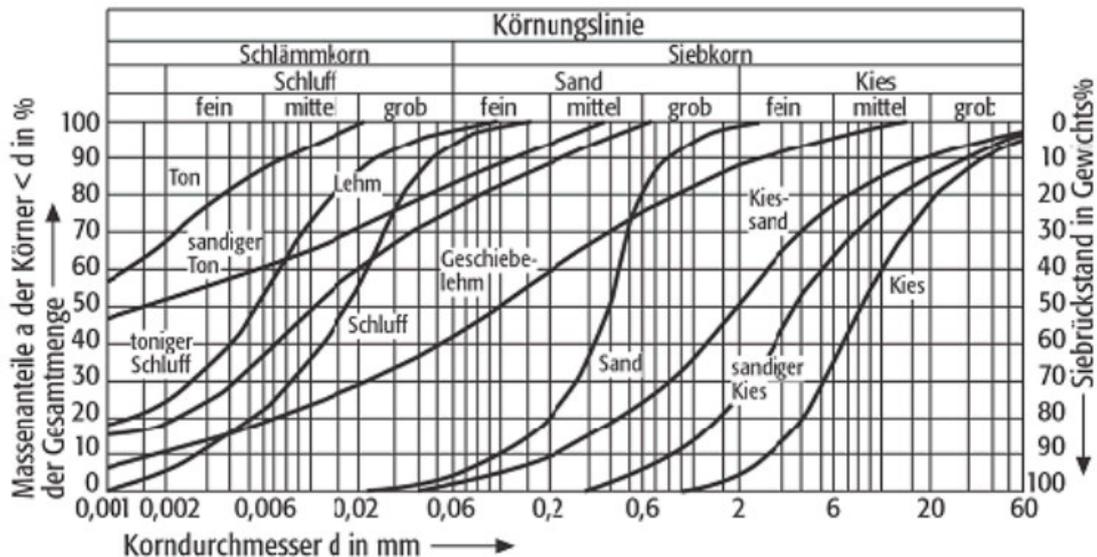


Abbildung 4.21: Korngrößenverteilung (gewähltes Sohlmaterial: Kiessand) (entnommen aus [GEODZ, 2014], Zugriff am 14. 02. 2015)

Tabelle 4.8: Ansätze für die Beziehung zwischen äquivalenter Sandrauheit und charakteristischem Korndurchmesser (entnommen aus [LfU 2, 2002], S. 21)

Autor	Ansatz
[GARBRECHT, 1961]	$k_S = d_{90} = 20 \text{ mm}$
[ENGELUND, 1966]	$k_S = 2 \times d_{65} = 2 \times 3 = 6 \text{ mm}$
[HEY, 1979]	$k_S = 3,5 \times d_{84} = 3,5 \times 12 = 42 \text{ mm}$
[KAMPHIUS, 1974]	$k_S = 2 \times d_{50} = 2 \times 2,5 = 5 \text{ mm}$
[MERTENS, 1996]	$k_S = 2,5 \times d_{50} = 2,5 \times 2,5 = 6,25 \text{ mm}$
[DITTRICH, 1998] Kies	$k_S = 3,5 \times d_m = 3,5 \times 2,5 = 8,75 \text{ mm}$
Grobkies, Steine	$k_S = 3,5 d_{84} = 2 \times 12 = 42 \text{ mm}$
<b>Mittelwert für Kiessand:</b>	<b><math>k_S = (20+6+42+5+6,25+8,75+42)/7 = 22 \text{ mm}</math></b>

Nach Tabelle 4.8 würde sich die äquivalente Sandrauheit der Sohle zu 22 mm ergeben. Weil aber in der Sohle immer wieder Wasserbausteine zu sehen sind, wird der Wert  $k_{S,\text{Sohle}}$  mit 6 cm festgelegt. Abbildung 4.22 zeigt die Gewässersohle des Zickenbaches bei Siget in der Wart.



Abbildung 4.22: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Gewässersohle, Gewässerbreite = 3,9 m ca., sandiger Kies, vereinzelt größere Wasserbausteine –  $k_{S, \text{Sohle}} = 6 \text{ cm}$

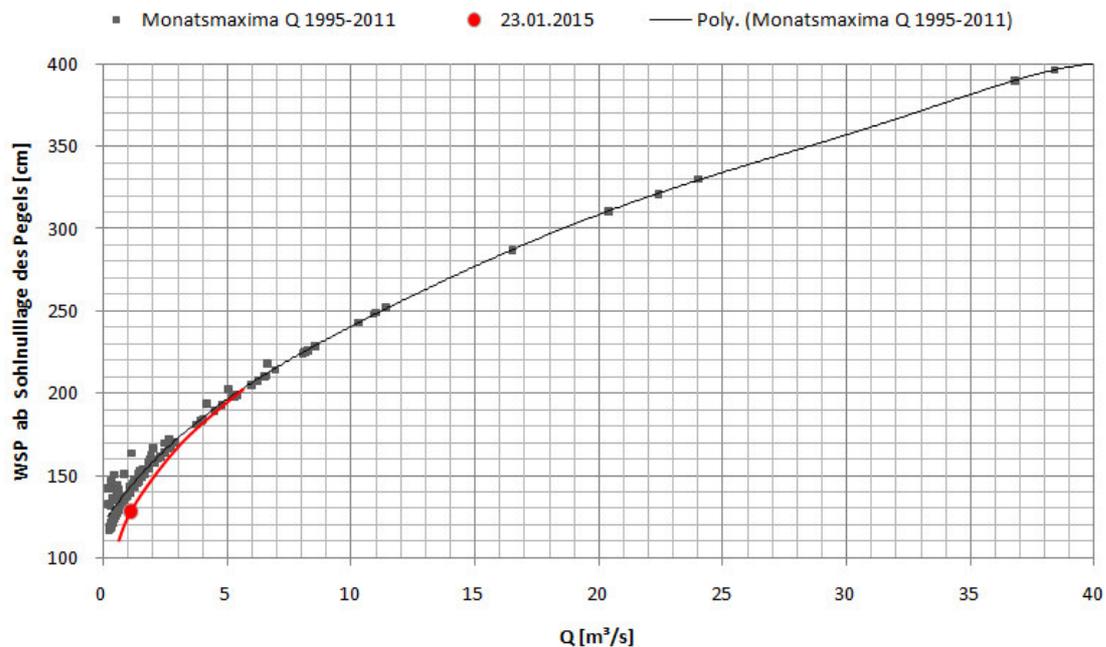


Abbildung 4.23: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Durchflusswerte (Monatsmaxima jeweils im Zeitraum von 1995-2011) in Abhängigkeit vom Wasserstand

Abbildung 4.23 zeigt die Monatsmaxima der Durchflüsse im Zeitraum von 1995 - 2011 in Abhängigkeit vom Wasserstand für den Zickenbach beim Pegel Siget in der Wart.

Der **rote Punkt** in dieser Abbildung resultiert aus der durchgeführten Fließgeschwindigkeitsmessung und Rückrechnung des Durchflusses. Die Abweichungen (entsprechen der roten Kurve) werden bei den nachfolgenden Berechnungen berücksichtigt (v.a. bei Nieder- und Mittelwasserverhältnissen). Die Differenz zwischen den resultierenden  $k_{St}$ -Werten (aufgrund des Unterschiedes zwischen korrigierten und nicht korrigierten Pegelschlüssel-Werten) wird ebenfalls dargestellt.

In Tabelle 4.9 sind die Strickler-Beiwerte (berechnet mithilfe der GMS-Formel) inkl. aller notwendigen Daten aufgelistet. Weil speziell bei Niederwasserverhältnissen die Genauigkeit der berechneten **Rauheitsbeiwerte** mit der **GMS-Gleichung** nicht gegeben ist (siehe dazu Abbildung 2.10), wird im Folgenden auch mithilfe der **DW-Gleichung** ein Strickler-Beiwert errechnet. Den letzten Teil der Tabelle stellt die Ermittlung des Strickler-Beiwertes nach **COWAN** dar.

Tabelle 4.9: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Strickler-Beiwerte

	23.01.2015		PS korrr.	mit Pegelschlüssel-Werten				
WSP =	128	cm	160	160	195	240	310	395
Q =	1.2	m <sup>3</sup> /s	2.5	2.1	5.0	10.0	20.0	42.0
A =	1.53	m <sup>2</sup>	2.92	2.92	4.70	8.04	16.93	43.52
v <sub>urspr.</sub> =	0.8	m/s	1.0	0.7	1.1	1.2	1.2	1.0
A <sub>Abzug</sub> =	0.13	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
v <sub>mittel</sub> =	0.7	m/s	0.9	0.7	1.1	1.2	1.2	1.0
Q <sub>tatsächlich</sub> =	1.1	m <sup>3</sup> /s	2.7	2.1	5.0	10.0	20.0	42.0
I <sub>E</sub> =	0.002		0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
U =	4.39	m	5.28	5.28	6.66	8.04	16.84	50.81
B <sub>0</sub> =	4.04	m	4.64	4.64	5.79	9.64	15.65	49.16
R <sub>Hy</sub> =	0.35	m	0.55	0.55	0.71	1.00	1.01	0.86
y =	0.38	m	0.63	0.63	0.81	0.83	1.08	0.89
k <sub>g,GMS</sub> =	34.8	m <sup>1/3</sup> /s	32.5	25.2	31.6	29.3	27.7	25.2
k <sub>s,ges</sub> /4*R <sub>Hy</sub> =	0.07		0.07	0.17	0.07	0.07	0.09	0.12
h <sub>Gr</sub> =	0.20	m	0.33	0.28	0.42	0.48	0.55	0.42
v <sub>Gr</sub> =	1.40	m/s	1.79	1.64	2.04	2.17	2.32	2.03
Fr =	0.38		0.37	0.29	0.38	0.43	0.36	0.33
y =	0.38	m	0.63	0.63	0.81	0.83	1.08	0.89
Re =	8.43E+05		1.70E+06	1.31E+06	2.48E+06	4.11E+06	3.93E+06	2.73E+06
B <sub>0</sub> / y =	10.67		7.39	7.39	7.12	11.56	14.47	55.53
f <sub>Trapaz/R.</sub> =	0.83		0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.74
λ =	0.092		0.090	0.150	0.088	0.091	0.102	0.130
k <sub>s,ges,iterat.</sub> =	0.102	m	0.157	0.367	0.191	0.290	0.357	0.407
[4], links =	3.300		3.328	2.580	3.371	3.310	3.134	2.775
[4], rechts =	3.302		3.331	2.581	3.373	3.312	3.135	2.776
Fehler =	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
k <sub>St,c+W</sub> =	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	33.6	26.4	32.7	30.3	28.7	27.2
Δk <sub>St</sub> =	1.14	m <sup>1/3</sup> /s	1.06	1.17	1.01	0.95	0.97	1.96
n <sub>0</sub> =	0.024		0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
n <sub>1</sub> =	0.003		0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000
n <sub>2</sub> =	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
n <sub>3</sub> =	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
n <sub>4</sub> =	0.001		0.005	0.005	0.006	0.008	0.010	0.012
m <sub>5</sub> =	1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
k <sub>St,cowan</sub> =	35.7	m <sup>1/3</sup> /s	32.3	32.3	31.7	30.3	28.6	27.8

In Tabelle 4.9 ist zu erkennen, dass der **Unterschied** zwischen dem hydraulischen Radius **R<sub>Hy</sub>** und der **Wassertiefe y** vernachlässigbar klein ist. Für die Berechnung des k<sub>St</sub>-Wertes wird jedenfalls R<sub>Hy</sub> verwendet. Dieser Unterschied würde sich nur bei sehr kompakten Gerinnequerschnitten auswirken.

Der **Unterschied** zwischen den **Strickler-Beiwerten** aus gemessener und berechneter Fließgeschwindigkeit ist größer. Beispielsweise ergibt sich der k<sub>St</sub>-Wert bei einem WSP ab Sohlnulllage des Pegels von 160 cm (also einer mittleren Wassertiefe von 63 cm) **mit einer Korrektur des Pegelschlüssels** (unter Einbeziehung der gemesse-

nen Fließgeschwindigkeiten) zu  $32,5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , ohne Korrektur zu  $26,4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Zur Erstellung der nachfolgenden Ergebnis-Grafiken werden also die durchgeführten Fließgeschwindigkeitsmessungen berücksichtigt.

Für ausgewählte Durchflüsse bzw. Wasserstände wurde nachfolgend der **Rauheitsbeiwert** ( $k_{St}$ -Wert) mittels der empirischen Formel nach **GAUCKLER-MANNING-STRICKLER** und dem universellen Fließgesetz nach **DARCY-Weißbach** (inkl. Ermittlung des Widerstandes nach **COLEBROOK und WHITE**) berechnet. Außerdem wurde mit Hilfe des Verfahrens nach **INDLEKOFER** aus dem Jahr **2003** und einem überschlägigen Verfahren, basierend auf **EINSTEIN** und **HORTEN**, der Strickler-Beiwert von Sohle und Böschung bei unterschiedlichen Wasserständen bzw. Durchflüssen ermittelt (siehe Tabelle 4.10). Alle Berechnungen und Abbildungen folgen auf den nächsten Seiten. Ausgangspunkt ist ein gewählter Wert für die Sohlrauheit  $k_{S, \text{Sohle}}$  von 6 cm.

Tabelle 4.10: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Strickler-Beiwerte **Gesamt**, für die **Sohle** und für die **Böschung**, **rot dargestellte Werte in der Spalte**: Zahlenwerte ohne Korrektur des Pegelschlüssels (die grün schraffierten Zellen werden bei der Iteration verändert, bis die Summe der Teilflächen gleich der Gesamtfläche entspricht; siehe Abbildung 2.13)

$k_{s,s}/R_{hy,s} =$	0.21		0.15	0.20	0.12	0.10	0.10	0.13	1. ITERATION
$k_{s,böi}/R_{hy,bö} =$	0.59		0.55	1.46	0.44	0.45	0.43	0.50	
$R_{hy,sohle} =$	0.29	m	0.41	0.29	0.49	0.61	0.57	0.46	
$R_{hy,böschung} =$	0.52	m	0.80	0.98	0.91	1.27	1.11	0.88	
$A_{sohle} =$	0.97	m <sup>2</sup>	1.34	0.97	1.62	2.02	1.89	1.51	
$A_{böschung} =$	0.56	m <sup>2</sup>	1.57	1.95	3.08	6.02	15.05	42.01	
$A_{indlek.03} =$	1.53	m <sup>2</sup>	2.92	2.92	4.70	8.04	16.93	43.52	
$A_{soll} =$	1.53	m <sup>2</sup>	2.92	2.92	4.70	8.04	16.93	43.52	
Fehler =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$K_{sohle} =$	1.176		1.048	1.175	0.994	0.947	0.960	1.013	
$K_{böschung} =$	2.254		2.109	6.515	1.789	1.814	1.740	1.961	
$k_{st,s} =$	40.4	m <sup>1/3</sup> /s	41.2	40.3	41.5	41.9	41.8	41.3	
$k_{s,bö,it} =$	0.31	m	0.44	1.43	0.41	0.57	0.47	0.44	
$k_{st,bö,it} =$	27.6	m <sup>1/3</sup> /s	26.4	17.9	27.4	25.8	26.9	26.6	
$k_{st,ges} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	33.6	26.4	32.7	30.3	28.7	27.2	
$k_{st,soll} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	33.6	26.4	32.7	30.3	28.7	27.2	
$\Delta k_{st} =$	0.00	m <sup>1/3</sup> /s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$k_{st,s,neu} =$	40.4	m <sup>1/3</sup> /s	41.2	40.5	41.6	41.9	41.8	41.5	2. ITERATION
$R_{hy,sohle,neu} =$	0.29	m	0.41	0.29	0.49	0.61	0.57	0.45	
$A_{sohle,neu} =$	0.97	m <sup>2</sup>	1.34	0.96	1.62	2.02	1.89	1.50	
$R_{hy,bö,neu} =$	0.52	m	0.80	0.99	0.92	1.27	1.11	0.88	
$A_{böschung,neu} =$	0.56	m <sup>2</sup>	1.57	1.95	3.08	6.02	15.05	42.02	
$A_{indlek.03,neu} =$	1.53	m <sup>2</sup>	2.91	2.92	4.70	8.04	16.93	43.52	
$A_{soll} =$	1.53	m <sup>2</sup>	2.92	2.92	4.70	8.04	16.93	43.52	
Fehler =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$K_{sohle} =$	1.176		1.048	1.178	0.995	0.947	0.960	1.015	
$K_{böschung} =$	2.252		2.109	6.482	1.787	1.814	1.740	1.961	
$k_{s,bö,it} =$	0.31	m	0.44	1.44	0.41	0.57	0.47	0.44	
$k_{st,bö,it} =$	27.6	m <sup>1/3</sup> /s	26.4	17.9	27.4	25.8	26.9	26.6	
$k_{st,ges} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	33.6	26.4	32.7	30.3	28.7	27.2	
$k_{st,soll} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	33.6	26.4	32.7	30.3	28.7	27.2	
$\Delta k_{st} =$	0.00	m <sup>1/3</sup> /s	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
$U_{sohle} =$	3.3	m	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	
$U_{bö} =$	1.1	m	2.0	2.0	3.4	4.7	13.5	47.5	
$k_{st,sohle} =$	40.4	m <sup>1/3</sup> /s	41.2	40.5	41.6	41.9	41.8	41.5	
$k_{st,bö,it} =$	27.6	m <sup>1/3</sup> /s	26.4	17.9	27.4	25.8	26.9	26.6	
$k_{st,ges,vorg} =$	36.0	m <sup>1/3</sup> /s	33.6	26.4	32.7	30.3	28.7	27.2	
Fehler =	-0.01	m <sup>1/3</sup> /s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Abbildung 4.24 zeigt den Verlauf der  $k_{st}$ -Werte und der Wasserspiegel in Abhängigkeit vom Durchfluss. Dabei wurden zur Erstellung des Pegelschlüssels die Maximalwerte der Durchflüsse in jedem Monat (Zeitraum 1995 – 2011) herangezogen („Pegelschlüssel-Werte und Ergebnisse“). Bei Nieder- und Mittelwasser wurden die Werte

entsprechend den eigenen Fließgeschwindigkeitsmessungen angepasst („korrigierte [korr.] Werte“).

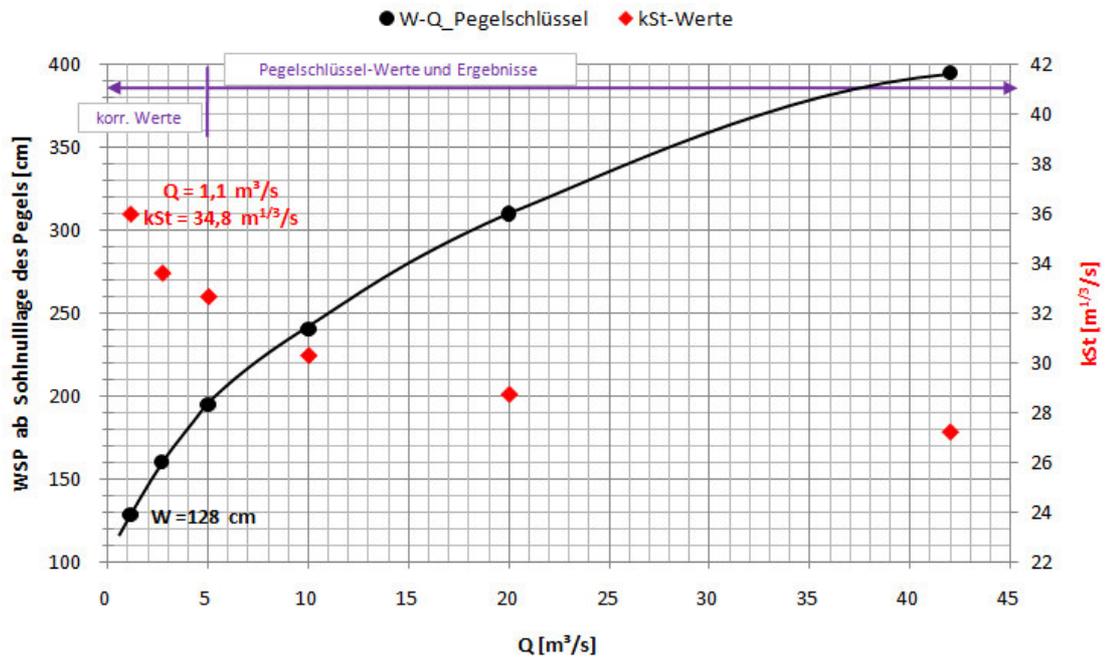


Abbildung 4.24: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Verlauf des  $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss (beschriftete Werte: Durchfluss, Wasserstand und  $k_{St}$ -Wert am Tag der Vermessung)

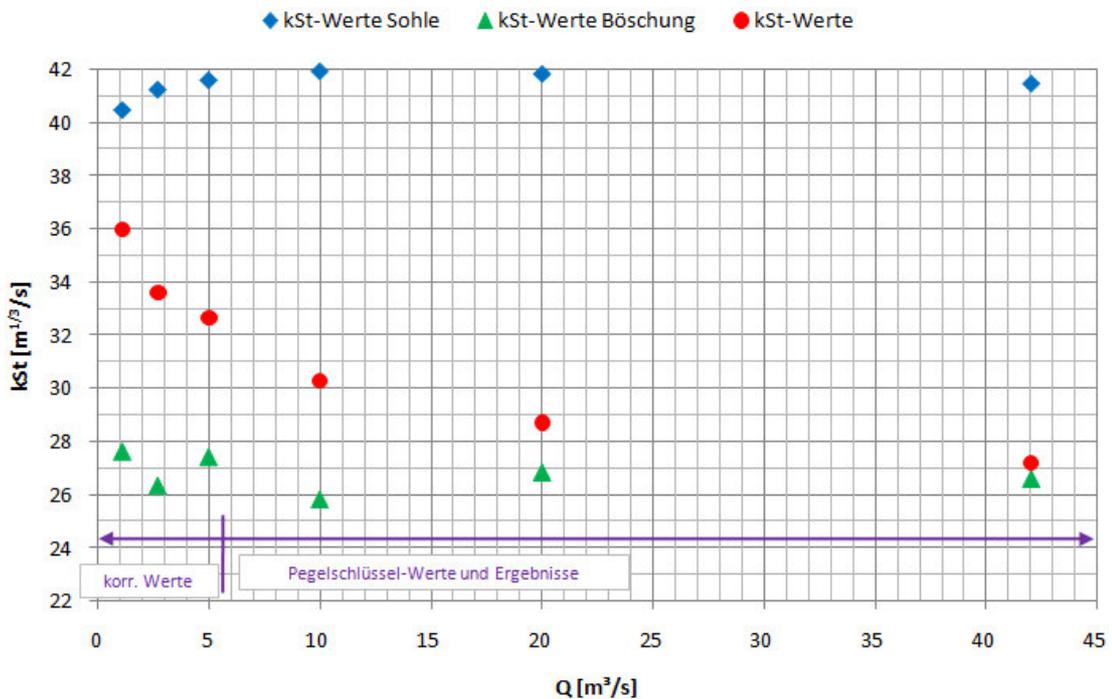


Abbildung 4.25: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Verlauf der  $k_{St}$ -Werte (über den Abfluss)

In Abbildung 4.25 sind die Rauheitsbeiwerte bei unterschiedlichen Durchflüssen dargestellt. Mit zunehmendem Abfluss sinkt der  $k_{St}$ -Wert. Dies hängt damit zusammen,

dass die Sohle relativ glatt ist und bei Niederwasser größeren Einfluss auf den Fließwiderstand als die Böschung hat. Bei Hochwasser werden größere Teile des Querschnittes durchströmt und die Rauheit der Böschung hat größeren Einfluss auf den Gesamt-Strickler-Beiwert.

Der niedrigste  $k_{St}$ -Wert stellt sich beim größten Durchfluss in obiger Abbildung ein, weil hier relativ großflächig und mit geringer Höhe die flacheren Böschungsbereiche überströmt werden. Es kommt wegen der Wirbelbildung zu einer zusätzlichen Energievernichtung (siehe Kapitel 2.8.2).

Abbildung 4.26 zeigt schematisch das Querprofil des Zickenbaches bei Siget in der Wart. Die mittleren Wassertiefen sind in Abhängigkeit des Durchflusses dargestellt und die berechneten Strickler-Beiwerte angegeben.

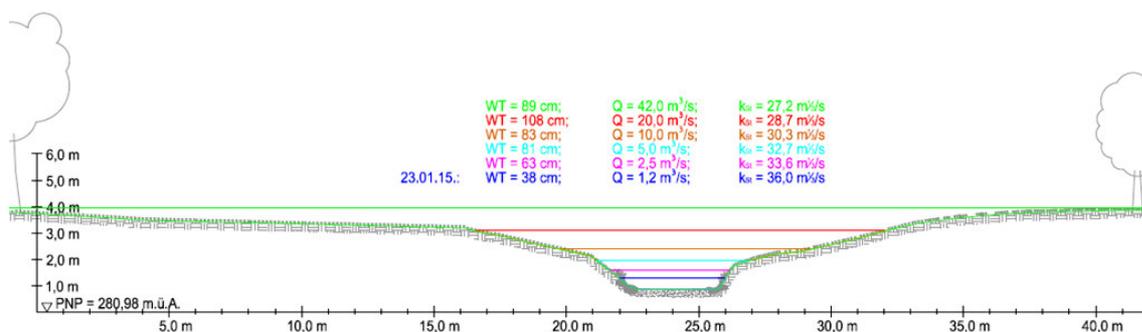


Abbildung 4.26: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der  $k_{St}$  - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q

#### 4.4 Tauchenbach bei Altschlaining

- Hydrometrische Station: Tauchenbach (Fluss-km: 18,70; Altschlaining)
- orographische Einzugsgebietsgröße: 89,2 km<sup>2</sup>
- Pegelnullpunkt: 315,78 m ü.A.
- Sohlgefälle: 5 ‰ (Abstürze vor und nach dem Pegel teilweise berücksichtigt), ca. 13 ‰ mit Abstürze (v.a. bei Hochwasser ist das Energieliniengefälle größer)
- Gerinnebreite an der Wasseroberfläche (bei MQ): 4,6 m, Sohlbreite: ca. 3,9 m
- Abflussgerinne: Trapezprofil mit Sohle aus Sand und Kies, Böschungen verkrautet bzw. stark bewachsen (größere Sträucher und Bäume), Wasserbausteine am Böschungsfuß

Tabelle 4.11: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])

Jährlichkeit des Abflusses	Q95%	MQ	HQ1	HQ5	HQ10	HQ30	HQ100
Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,12	0,41	3	9	17	60	120

Abbildung 4.27 zeigt den Tauchenbach beim Pegel in Altschlaining, Blick gegen die Fließrichtung, Abbildung 4.28 in Fließrichtung.



Abbildung 4.27: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014



Abbildung 4.28: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014

Obige Bilder wurden von einem Steg (auf Höhe des Pegels ca.) gemacht. Schwierig gestaltete sich hier eine Festlegung für das Sohlgefälle (3 ‰ in etwa ohne- und 13 ‰ mit Berücksichtigung der Abstürze vor- und nach dem Pegel). Aufgrund dessen, dass die Fließgeschwindigkeit bzw. der Wasserstand am Tag der Vermessung nicht außergewöhnlich hoch war (ca. Mittelwasserverhältnisse), wurde für die weitere Berechnung ein **Sohlgefälle** von 5 ‰ gewählt (der Einfluss der Abstürze also nur zu einem geringen Teil berücksichtigt).

Die **äquivalente Sandrauheit der Sohle** wurde analog zum  $k_S$ -Wert des Zickenbaches mit 2,2 cm berechnet (die Sohle besteht wiederum aus sandigem bis kiesigem Material). Aufgrund vorhandener Unebenheiten und größerer Steine im Sohlbereich wird die äquivalente Sandrauheit für die nachfolgenden Berechnungen mit 8 cm abgeschätzt. Abbildung 4.29 zeigt die Gewässersohle des Tauchenbaches bei Altschlaining.



Abbildung 4.29: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Gewässersohle (Kiessand und vereinzelt Wasserbausteine) –  $k_{S, \text{Sohle}}$  beträgt aufgrund von Sohlunebenheiten 8 cm

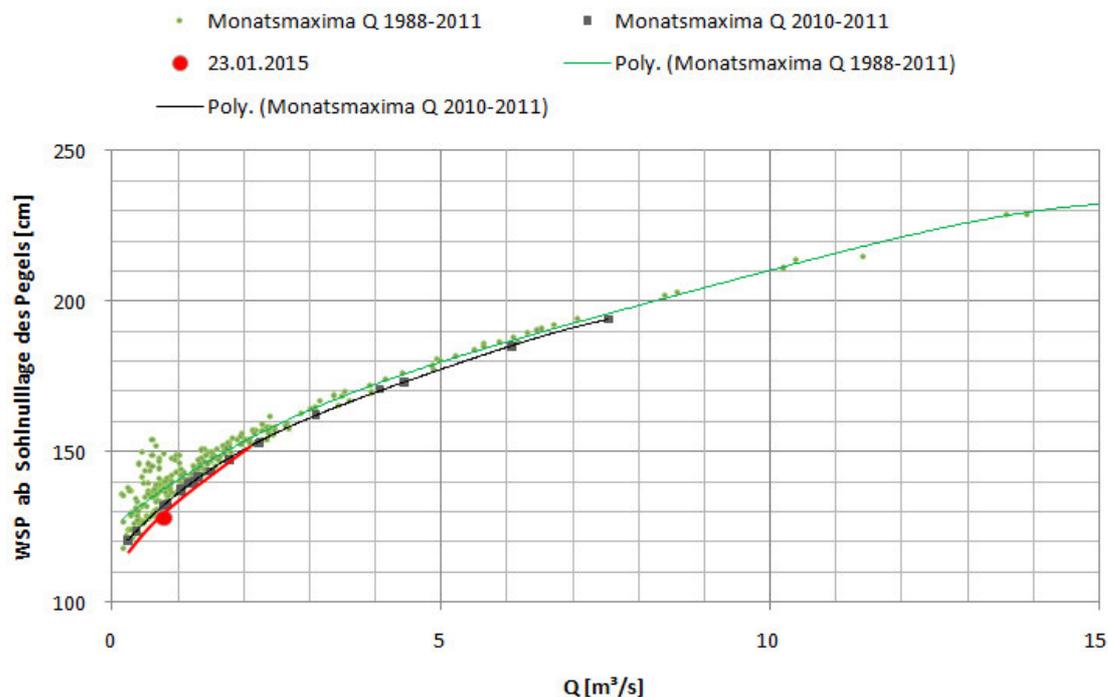


Abbildung 4.30: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Durchflusswerte (Monatsmaxima jeweils im Zeitraum von 1988-2011 und von 2010-2011) in Abhängigkeit vom Wasserstand

Abbildung 4.30 zeigt die **Monatsmaxima der Durchflüsse** im Zeitraum von 1998 – 2011 (grün) und von 2010 – 2011 (grau) **in Abhängigkeit vom Wasserstand**. Bei den nachfolgenden Berechnungen werden bis zu  $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$  neuere Durchfluss- und Wasserstandwerte, über  $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$  auch ältere Werte berücksichtigt.

Der **rote Punkt** resultiert aus der durchgeführten Fließgeschwindigkeitsmessung und Rückrechnung des Durchflusses. Die Abweichungen (siehe rote Linie) werden bei den nachfolgenden Berechnungen berücksichtigt (v.a. bei Nieder- und Mittelwasser-Verhältnissen).

In Tabelle 4.12 sind die Strickler-Beiwerte (berechnet mithilfe der **GMS-Formel**) inkl. aller notwendigen Daten aufgelistet. Weil speziell bei Niederwasser-Verhältnissen die Genauigkeit der berechneten **Rauheitsbeiwerte** mit der **GMS-Gleichung** nicht gegeben ist (siehe dazu Abbildung 2.10), wird im Folgenden auch mithilfe der **DW-Gleichung** ein Strickler-Beiwert errechnet. Den letzten Teil der Tabelle stellt die Ermittlung des Strickler-Beiwertes nach **COWAN** dar.

Tabelle 4.12: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Strickler-Beiwerte

	23.01.2015		PS korrr.	mit Pegelschlüssel-Werten				
WSP =	128	cm	142	142	160	178	210	232
Q =	0.8	m <sup>3</sup> /s	1.5	1.2	3.0	5.0	10.0	15.0
A =	1.25	m <sup>2</sup>	1.93	1.93	2.86	3.90	6.08	7.85
V <sub>urspr.</sub> =	0.7	m/s	0.8	0.6	1.0	1.3	1.6	1.9
A <sub>Abzug</sub> =	0.08	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V <sub>mittel</sub> =	0.6	m/s	0.8	0.6	1.0	1.3	1.6	1.9
Q <sub>tatsächlich</sub> =	0.8	m <sup>3</sup> /s	1.5	1.2	3.0	5.0	10.0	15.0
l <sub>E</sub> =	0.005		0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
U =	4.93	m	5.30	5.30	5.92	6.67	8.29	9.29
B <sub>0</sub> =	4.71	m	4.96	4.96	5.45	6.11	7.59	8.49
R <sub>Hy</sub> =	0.25	m	0.36	0.36	0.48	0.59	0.73	0.84
y =	0.27	m	0.39	0.39	0.53	0.64	0.80	0.92
<u>k<sub>St,GMS</sub></u> =	<u>21.9</u>	<u>m<sup>1/3</sup>/s</u>	<u>21.5</u>	<u>17.2</u>	<u>24.0</u>	<u>25.9</u>	<u>28.6</u>	<u>30.2</u>
k <sub>s,ges</sub> /4*R <sub>Hy</sub> =	0.33		0.30	0.48	0.20	0.15	0.10	0.07
h <sub>Gr</sub> =	0.14	m	0.21	0.18	0.31	0.41	0.56	0.68
v <sub>Gr</sub> =	1.18	m/s	1.44	1.33	1.75	2.00	2.35	2.59
Fr =	0.39		0.40	0.32	0.46	0.51	0.59	0.63
y =	0.27	m	0.39	0.39	0.53	0.64	0.80	0.92
Re =	5.23E+05		9.36E+05	7.49E+05	1.68E+06	2.48E+06	3.99E+06	5.34E+06
B <sub>0</sub> / y =	17.72		12.72	12.72	10.37	9.57	9.48	9.18
f <sub>Trapez/R.</sub> =	0.83		0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
λ =	0.258		0.237	0.370	0.173	0.140	0.106	0.091
<u>k<sub>s,ges,iterat.</sub></u> =	<u>0.336</u>	<u>m</u>	<u>0.437</u>	<u>0.698</u>	<u>0.392</u>	<u>0.349</u>	<u>0.280</u>	<u>0.242</u>
[4], links =	1.968		2.054	1.644	2.404	2.673	3.066	3.319
[4], rechts =	1.973		2.058	1.644	2.406	2.675	3.071	3.324
Fehler =	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<u>k<sub>St,cAW</sub></u> =	<u>23.4</u>	<u>m<sup>1/3</sup>/s</u>	<u>22.9</u>	<u>18.6</u>	<u>25.3</u>	<u>27.0</u>	<u>29.7</u>	<u>31.2</u>
Δk <sub>St</sub> =	1.49	m <sup>1/3</sup> /s	1.37	1.41	1.23	1.15	1.07	1.01
n <sub>0</sub> =	0.025		0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
n <sub>1</sub> =	0.005		0.006	0.006	0.004	0.002	0.001	0.000
n <sub>2</sub> =	0.005		0.005	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
n <sub>3</sub> =	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
n <sub>4</sub> =	0.005		0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005
m <sub>5</sub> =	1.050		1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050
<u>k<sub>St,cNwan</sub></u> =	<u>23.8</u>	<u>m<sup>1/3</sup>/s</u>	<u>22.7</u>	<u>22.7</u>	<u>25.1</u>	<u>27.2</u>	<u>28.9</u>	<u>30.7</u>

In Tabelle 4.12 ist zu erkennen, dass auch hier der **Unterschied** zwischen dem hydraulischen Radius  $R_{Hy}$  und der **Wassertiefe**  $y$  vernachlässigbar klein ist. Für die Berechnung des  $k_{St}$ -Wertes wird jedenfalls  $R_{Hy}$  verwendet. Dieser Unterschied würde sich nur bei sehr kompakten Gerinnequerschnitten auswirken (trotzdem ist der Unterschied zwischen  $R_{Hy}$  und  $y$  größer als bei der Pinka z.B.).

Der **Unterschied** zwischen den **Strickler-Beiwerten** aus gemessener und berechneter Fließgeschwindigkeit ist gut zu erkennen. Beispielsweise ergibt sich der  $k_{St}$ -Wert bei einem WSP ab Sohlnulllage des Pegels von 160 cm (also einer mittleren

Wassertiefe von 63 cm) mit einer Korrektur des Pegelschlüssels (unter Einbeziehung der gemessenen Fließgeschwindigkeiten) zu  $32,5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , ohne Korrektur zu  $26,4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Zur Erstellung der nachfolgenden Ergebnis-Grafiken werden also die durchgeführten Fließgeschwindigkeitsmessungen berücksichtigt.

Für ausgewählte Durchflüsse bzw. Wasserstände wurde so der **Rauheitsbeiwert** ( $k_{St}$ -Wert) mittels der empirischen Formel nach **GAUCKLER-MANNING-STRICKLER** und dem universellen Fließgesetz nach **DARCY-Weißbach** (inkl. Ermittlung des Widerstandes nach **COLEBROOK und WHITE**) berechnet. Außerdem wurde mit Hilfe des Verfahrens nach **INDLEKOFER** aus dem Jahr **2003** und einem überschlägigen Verfahren, basierend auf **EINSTEIN** und **HORTEN**, der Strickler-Beiwert von Sohle und Böschung bei unterschiedlichen Wasserständen bzw. Durchflüssen ermittelt (siehe Tabelle 4.13). Alle Berechnungen und Abbildungen folgen auf den nächsten Seiten. Ausgangspunkt ist ein gewählter Wert für die Sohlrauheit  $k_{S, \text{Sohle}}$  von 8 cm.

Tabelle 4.13: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Strickler-Beiwerte **Gesamt**, für die **Sohle** und für die **Böschung**, **rot dargestellte Werte in der Spalte**: Zahlenwerte ohne Korrektur des Pegelschlüssels (die grün schraffierten Zellen werden bei der Iteration verändert, bis die Summe der Teilflächen gleich der Gesamtfläche entspricht; siehe Abbildung 2.13)

$k_{s,s}/R_{hy,s} =$	0.57		0.43	0.56	0.30	0.23	0.16	0.13	1. ITERATION
$k_{s,bö}/R_{hy,bö} =$	3.41		2.90	4.27	1.76	1.14	0.60	0.41	
$R_{hy,sohle} =$	0.14	m	0.18	0.14	0.27	0.35	0.49	0.59	
$R_{hy,böschung} =$	0.69	m	0.87	0.98	0.90	0.92	0.95	1.03	
$A_{sohle} =$	0.55	m <sup>2</sup>	0.72	0.55	1.05	1.36	1.89	2.32	
$A_{böschung} =$	0.71	m <sup>2</sup>	1.21	1.38	1.82	2.55	4.19	5.53	
$A_{indlek.03} =$	1.25	m <sup>2</sup>	1.93	1.93	2.86	3.90	6.08	7.85	
$A_{soll} =$	1.25	m <sup>2</sup>	1.93	1.93	2.86	3.90	6.08	7.85	
Fehler =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$K_{sohle} =$	2.175		1.762	2.149	1.400	1.234	1.085	1.020	
$K_{böschung} =$	43.154		27.099	92.949	9.003	4.574	2.264	1.704	
$k_{st,s} =$	34.8	m <sup>1/3</sup> /s	36.1	34.9	37.5	38.2	39.1	39.5	
$k_{s,bö,it.} =$	2.35	m	2.51	4.20	1.59	1.05	0.57	0.42	
$k_{st,bö,it.} =$	12.0	m <sup>1/3</sup> /s	12.9	9.6	16.7	20.0	24.9	27.5	
$k_{st,ges} =$	23.4	m <sup>1/3</sup> /s	22.9	18.6	25.3	27.0	29.7	31.2	
$k_{st,soll} =$	23.4	m <sup>1/3</sup> /s	22.9	18.6	25.3	27.0	29.7	31.2	
$\Delta k_{st} =$	0.00	m <sup>1/3</sup> /s	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	
$k_{st,s,neu} =$	34.8	m <sup>1/3</sup> /s	36.0	34.9	37.4	38.2	39.1	39.5	2. ITERATION
$R_{hy,sohle,neu} =$	0.14	m	0.18	0.14	0.27	0.35	0.49	0.59	
$A_{sohle,neu} =$	0.55	m <sup>2</sup>	0.72	0.56	1.05	1.36	1.89	2.32	
$R_{hy,bö,neu} =$	0.69	m	0.87	0.98	0.90	0.92	0.95	1.03	
$A_{böschung,neu} =$	0.71	m <sup>2</sup>	1.21	1.37	1.82	2.55	4.18	5.53	
$A_{indlek.03,neu} =$	1.25	m <sup>2</sup>	1.93	1.93	2.86	3.90	6.08	7.85	
$A_{soll} =$	1.25	m <sup>2</sup>	1.93	1.93	2.86	3.90	6.08	7.85	
Fehler =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$K_{sohle} =$	2.175		1.761	2.147	1.400	1.234	1.085	1.020	
$K_{böschung} =$	43.158		27.191	93.312	9.006	4.578	2.265	1.704	
$k_{s,bö,it.} =$	2.35	m	2.51	4.19	1.59	1.05	0.57	0.42	
$k_{st,bö,it.} =$	12.0	m <sup>1/3</sup> /s	12.9	9.6	16.7	20.0	24.9	27.5	
$k_{st,ges} =$	23.4	m <sup>1/3</sup> /s	22.9	18.6	25.3	27.0	29.7	31.2	
$k_{st,soll} =$	23.4	m <sup>1/3</sup> /s	22.9	18.6	25.3	27.0	29.7	31.2	
$\Delta k_{st} =$	0.00	m <sup>1/3</sup> /s	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	
$U_{sohle} =$	3.9	m	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	
$U_{bö} =$	1.0	m	1.4	1.4	2.0	2.8	4.4	5.4	
$k_{st,sohle} =$	34.8	m <sup>1/3</sup> /s	36.0	34.9	37.4	38.2	39.1	39.5	
$k_{st,bö,it.} =$	12.0	m <sup>1/3</sup> /s	12.9	9.6	16.7	20.0	24.9	27.5	
$k_{st,ges,vorg.} =$	23.4	m <sup>1/3</sup> /s	22.9	18.6	25.3	27.0	29.7	31.2	
Fehler =	0.01	m <sup>1/3</sup> /s	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Abbildung 4.31 zeigt den Verlauf der  $k_{st}$ -Werte und der Wasserspiegel in Abhängigkeit vom Durchfluss. Dabei wurden zur Erstellung des Pegelschlüssels die Maximalwerte der Durchflüsse in jedem Monat (Zeitraum 2010 – 2011 und für die Erstellung eines Pegelschlüssels für größere Durchflüsse auch im Zeitraum 1988 - 2009) herangezogen („Pegelschlüssel-Werte und Ergebnisse“). Bei Nieder- und Mittelwasser wur-

den die Werte entsprechend den eigenen Fließgeschwindigkeitsmessungen angepasst („korrigierte [korr.] Werte“).

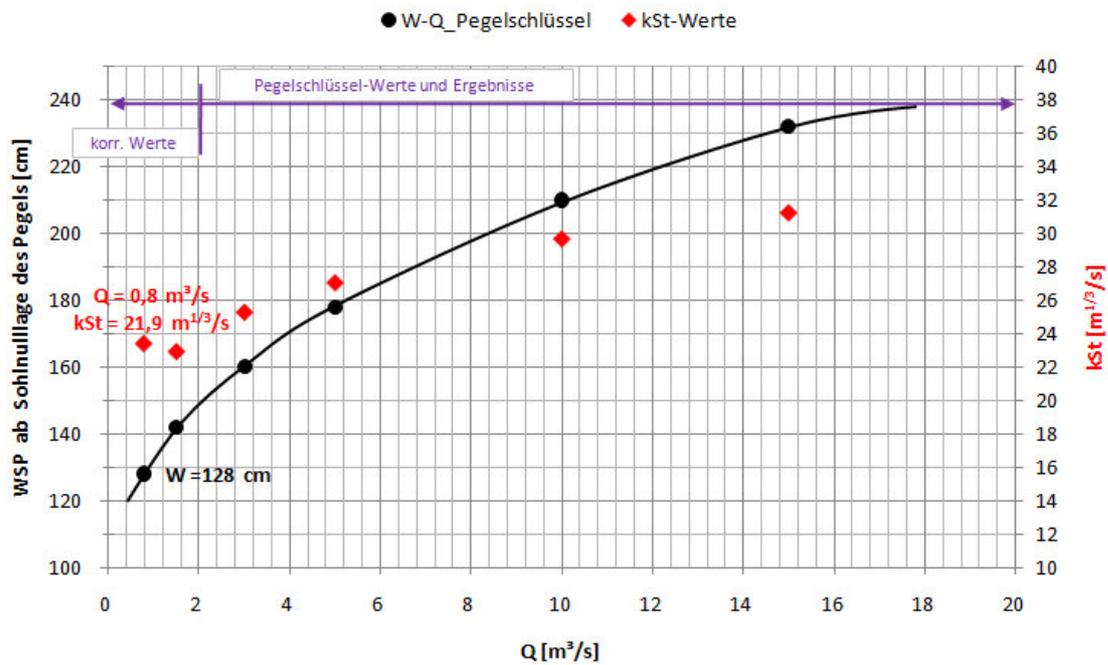


Abbildung 4.31: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Verlauf des  $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss (beschriftete Werte: Durchfluss, Wasserstand und  $k_{St}$ -Wert am Tag der Vermessung)

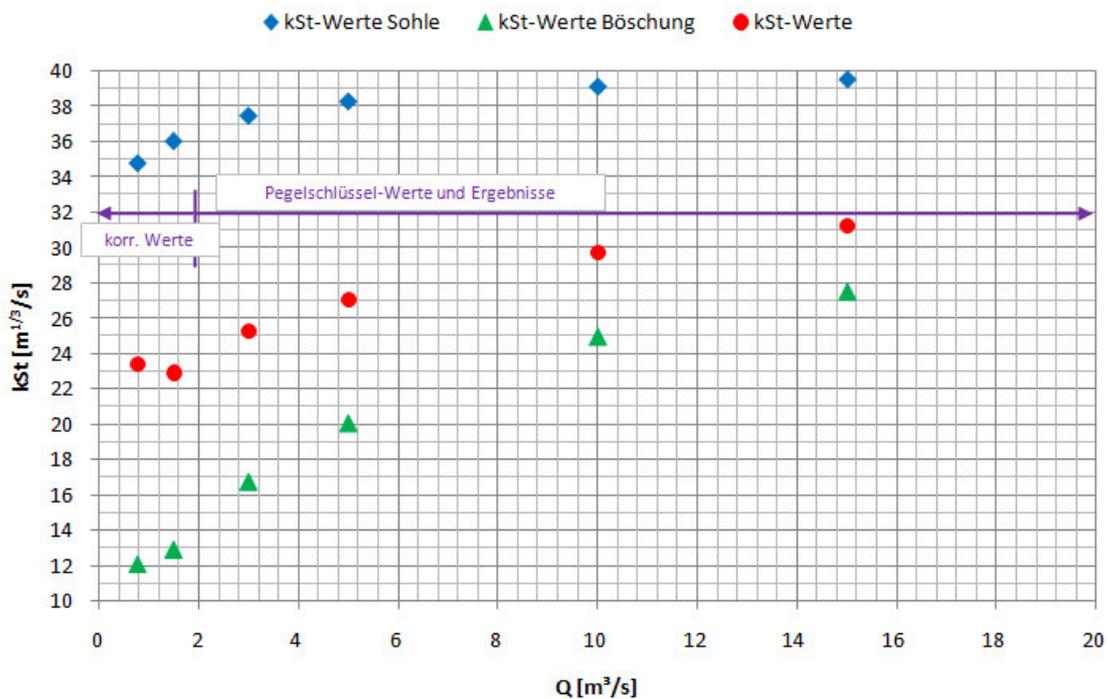


Abbildung 4.32: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Verlauf der  $k_{St}$ -Werte (über den Abfluss)

In Abbildung 4.32 sind die Rauheitsbeiwerte bei unterschiedlichen Durchflüssen dargestellt. Mit zunehmendem Abfluss steigen auch die Strickler-Beiwerte für die Sohle an. Der niedrige Gesamt- Strickler-Beiwert bei Nieder und Mittelwasserverhältnissen bis zu einem HQ1 ca. kann mit einem großen Böschungswiderstand bzw. kleinen Strickler-Beiwerten für die Böschung begründet werden (Gestrüpp und große Wasserbausteine am Böschungsfuß).

Bei einem größeren Hochwasser werden Gestrüpp und v.a. die Wasserbausteine am Böschungsfuß überströmt, der Widerstand geringer und der Gesamt- $k_{St}$ -Wert größer. Auch der Einfluss von strauch- und baumartigem Bewuchs auf der Böschung hat klarerweise Einfluss auf den Fließwiderstand, dennoch steigt der  $k_{St}$ -Wert für die Böschung mit zunehmendem Abfluss (Sträucher und Bäume werden umströmt). Wegen des vergleichsweise starken Bewuchses sind die ermittelten  $k_{St}$ -Werte kleiner als beim Zickenbach oder der Pinka.

Abbildung 4.33 zeigt schematisch das Querprofil des Tauchenbaches bei Altschlaining. Die mittleren Wassertiefen sind in Abhängigkeit des Durchflusses dargestellt und die berechneten Strickler-Beiwerte angegeben.

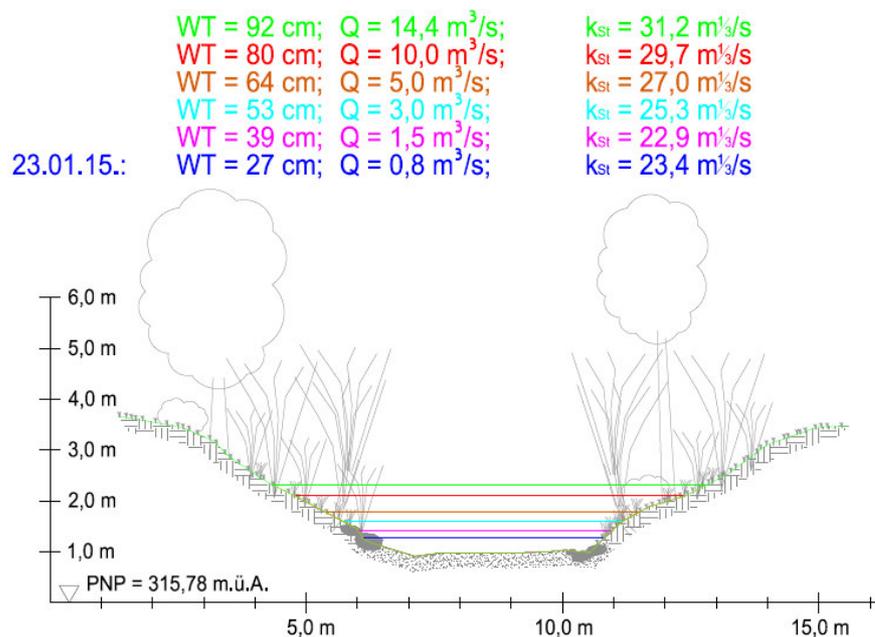


Abbildung 4.33: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der  $k_{St}$  - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q

#### 4.5 Raab bei Neumarkt

- Hydrometrische Station: Raab (Fluss-km: 221,18 Neumarkt)
- orographische Einzugsgebietsgröße: 986,5 km<sup>2</sup>
- Pegelnullpunkt: 230,64 m ü.A.
- Sohlgefälle durchschnittlich: 2 ‰<sup>4</sup> (= mit einem Abstand  $\Delta l$  von 25520 m und einem Höhenunterschied  $\Delta h$  von 44,81 m zwischen den Pegelstellen Feldbach und Neumarkt)
- Gerinnebreite an der Wasseroberfläche (bei MQ): 18 m, Sohlbreite: ca. 16 m
- Abflussgerinne: Trapezprofil mit Sohle aus Kies und größeren Wasserbausteinen, teilweise Kiesbänke und Buhnen; Böschungen unregelmäßig und verkrautet; überhängende Bäume und Sträucher im Bereich des Böschungsfußes

Tabelle 4.14: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])

Jährlichkeit des Abflusses	Q95%	MQ	HQ1	HQ5	HQ10	HQ30	HQ100
Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,78	6,77	95	180	214	265	337

Abbildung 4.34 zeigt die Raab beim Pegel in Neumarkt, Blick gegen die Fließrichtung, Abbildung 4.35 in Fließrichtung.

<sup>4</sup> keine terrestrische Vermessung des Sohlgefälles und keine Fließgeschwindigkeitsmessungen bei diesem Pegel durchgeführt



Abbildung 4.34: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahme vom 05. 10. 2014



Abbildung 4.35: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Blick in Fließrichtung; Aufnahme vom 05. 10. 2014

Im Folgenden wird aufgrund fehlender Daten (keine Vermessung des Sohlgefälles und keine eigenen Fließgeschwindigkeitsmessungen) davon abgesehen, eine Unterteilung in eine Sohl- und eine Böschungrauheit vorzunehmen. Aus diesem Grund wird mit den vorhandenen Daten vom Wasserportal Burgenland und ehyd lediglich ein „**Gesamt**“-  **$k_{St}$ -Wert** für unterschiedliche Wasserstände errechnet.

Abbildung 4.36 zeigt den **Pegelschlüssel** für die Raab in Neumarkt. Für die Erstellung wurden die Monatsmaxima der Durchflüsse zwischen 2005 und 2011, sowie die Minima zwischen 2009 und 2011 herangezogen. Die rote Kurve stellt eine Korrektur der schwarzen Linie bei Nieder- und Mittelwasser dar.

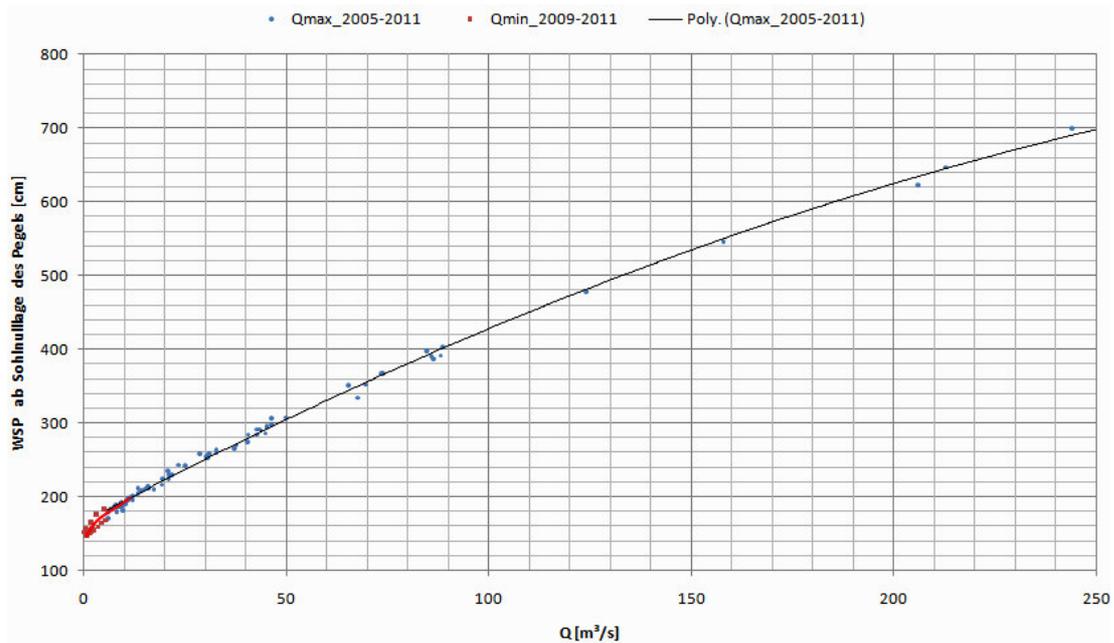


Abbildung 4.36: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Durchflusswerte (Monatsmaxima im Zeitraum von 2005-2011 und Monatsminima von 2009-2011) in Abhängigkeit vom Wasserstand (Raab in Neumarkt)

In Tabelle 4.15 sind die Strickler-Beiwerte (berechnet mithilfe der GMS-Formel) inkl. aller notwendigen Daten aufgelistet. Weil speziell bei Niederwasserverhältnissen die Genauigkeit der berechneten **Rauheitsbeiwerte** mit der **GMS-Gleichung** nicht gegeben ist (siehe dazu Abbildung 2.10), wird im Folgenden auch mithilfe der **DW-Gleichung** ein Strickler-Beiwert errechnet.

Tabelle 4.15: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Strickler-Beiwerte

	05.10.2014		mit Pegelschlüssel-Werten			22.10.2014	mit PS-Werten	
WSP =	213	cm	175	225	305	475	515	635
Q =	15.0	m <sup>3</sup> /s	5.0	19.5	50.0	120.0	150.0	220.0
A =	14.11	m <sup>2</sup>	6.95	16.12	33.19	75.98	87.86	127.85
v <sub>urspr.</sub> =	1.1	m/s	0.7	1.2	1.5	1.6	1.7	1.7
A <sub>Abzug</sub> =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
v <sub>mittel</sub> =	1.1	m/s	0.7	1.2	1.5	1.6	1.7	1.7
Q <sub>tatsächlich</sub> =	15.0	m <sup>3</sup> /s	5.0	19.5	50.0	120.0	150.0	220.0
l <sub>E</sub> =	0.002		0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
U =	19.66	m	18.52	20.09	23.58	30.55	32.34	39.90
B <sub>0</sub> =	18.86	m	18.21	19.21	22.28	28.37	29.95	37.01
R <sub>Hy</sub> =	0.72	m	0.38	0.80	1.41	2.49	2.72	3.20
y =	0.75	m	0.38	0.84	1.49	2.68	2.93	3.45
<b>k<sub>S,GMS</sub> =</b>	<b>29.7</b>	<b>m<sup>1/3</sup>/s</b>	<b>30.9</b>	<b>31.3</b>	<b>26.8</b>	<b>19.2</b>	<b>19.6</b>	<b>17.7</b>
k <sub>S,ges</sub> /4*R <sub>Hy</sub> =	0.08		0.10	0.06	0.08	0.18	0.16	0.20
h <sub>G</sub> =	0.40	m	0.20	0.47	0.80	1.22	1.37	1.53
v <sub>G</sub> =	1.98	m/s	1.39	2.15	2.80	3.46	3.66	3.88
Fr =	0.39		0.37	0.42	0.39	0.31	0.32	0.30
y =	0.75	m	0.38	0.84	1.49	2.68	2.93	3.45
Re =	2.52E+06		8.92E+05	3.21E+06	7.01E+06	1.30E+07	1.53E+07	1.82E+07
B <sub>0</sub> / y =	25.20		47.71	22.89	14.95	10.59	10.21	10.71
f <sub>Trapez/R.</sub> =	0.74		0.74	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
λ =	0.100		0.114	0.086	0.097	0.156	0.146	0.170
<b>k<sub>S,ges,iterat.</sub> =</b>	<b>0.219</b>	<b>m</b>	<b>0.144</b>	<b>0.208</b>	<b>0.457</b>	<b>1.742</b>	<b>1.728</b>	<b>2.524</b>
[4], links =	3.168		2.965	3.409	3.205	2.528	2.615	2.427
[4], rechts =	3.166		2.966	3.413	3.214	2.534	2.619	2.430
Fehler =	0.00		0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00
<b>k<sub>S,c+W</sub> =</b>	<b>31.6</b>	<b>m<sup>1/3</sup>/s</b>	<b>33.1</b>	<b>32.3</b>	<b>27.8</b>	<b>20.2</b>	<b>20.5</b>	<b>18.6</b>
Δk <sub>St</sub> =	1.93	m <sup>1/3</sup> /s	2.22	1.00	0.97	0.95	0.91	0.90

In Tabelle 4.15 ist zu erkennen, dass der **Unterschied** zwischen dem hydraulischen Radius **R<sub>Hy</sub>** und der **Wassertiefe y** vernachlässigbar klein ist. Für die Berechnung des k<sub>St</sub>-Wertes wird jedenfalls R<sub>Hy</sub> verwendet. Dieser Unterschied würde sich nur bei sehr kompakten Gerinnequerschnitten auswirken.

Abbildung 4.37 zeigt den Verlauf der k<sub>St</sub>-Werte und der Wasserspiegel in Abhängigkeit vom Durchfluss. Dabei wurden zur Erstellung des Pegelschlüssels die Maximalwerte der Durchflüsse in jedem Monat (Zeitraum 2005 – 2011) und die Monatsminima (Zeitraum 2009 – 2011) herangezogen. Außerdem wurden zwei Abflussereignisse aus dem Jahr 2014 berücksichtigt.

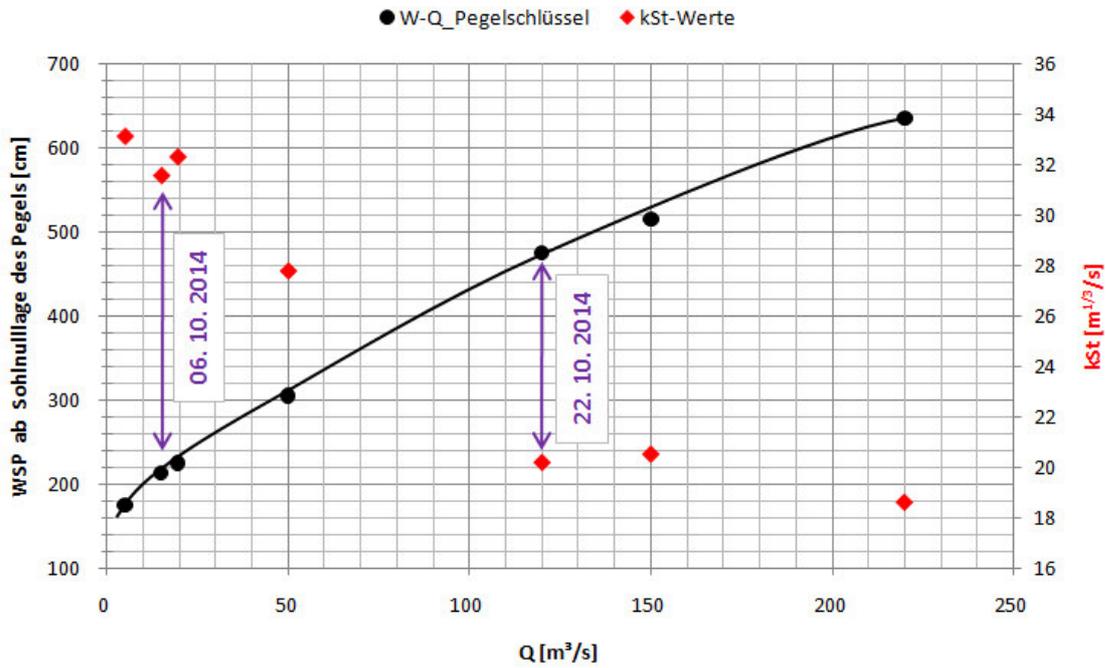


Abbildung 4.37: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Verlauf des  $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss

Aus Abbildung 4.37 geht hervor, dass sich bei niedrigen und mittleren Durchflüssen ein eher hoher  $k_{St}$ -Wert ergibt. Bei größeren Durchflüssen und Wasserständen kommt es zu einem Abfallen des  $k_{St}$ -Wertes. Die stark verkrautete Böschung hat bei höheren Wasserständen größeren Einfluss.

Abbildung 4.38 zeigt schematisch das Querprofil der Raab bei Neumarkt. Die mittleren Wassertiefen sind in Abhängigkeit des Durchflusses dargestellt und die berechneten Strickler-Beiwerte angegeben.

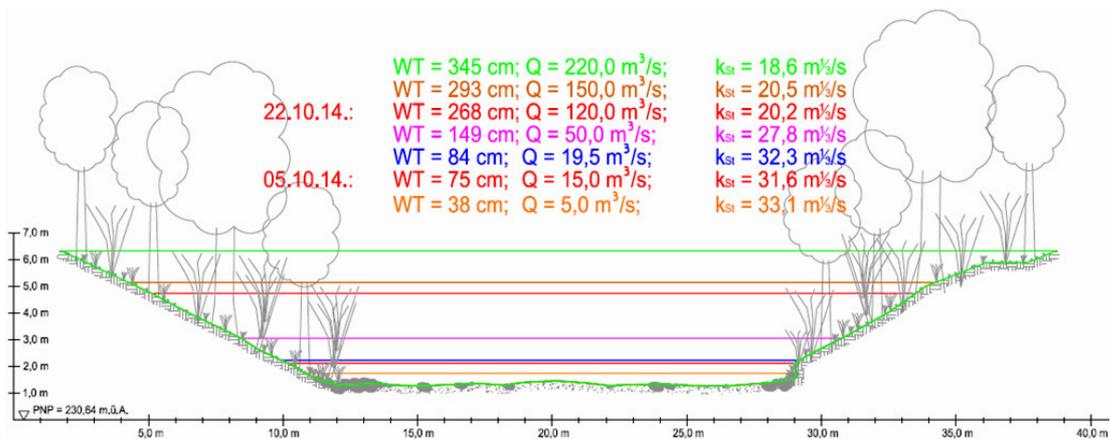


Abbildung 4.38: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der  $k_{St}$  - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q

#### 4.6 Lafnitz bei Eltendorf

- Hydrometrische Station: Lafnitz (Fluss-km: 6,75 Eltendorf)
- orographische Einzugsgebietsgröße: 1956,3 km<sup>2</sup>
- Pegelnullpunkt: 223,65 m ü.A.
- Sohlgefälle durchschnittlich: 1,5 ‰<sup>5</sup> (= mit einem Abstand  $\Delta l$  von 7330 m und einem Höhenunterschied  $\Delta h$  von 10,35 m zwischen den Pegelstellen Dobersdorf und Eltendorf), wegen des vorhandenen Absturzes der Sohle im Nahbereich des Pegels wird jedoch ein Gefälle von 3 ‰ gewählt
- Gerinnebreite an der Wasseroberfläche (bei MQ): 28 m, Sohlbreite: ca. 25 m
- Abflussgerinne: Trapezprofil mit Sohle aus Kies und größeren Wasserbausteinen, teilweise Kiesbänke und Untiefen, also größere Unebenheiten in der Sohle; Böschungen mit Wasserbausteinen gesichert, überhängende Bäume und Sträucher auf Höhe des Mittelwasser-WSP

Tabelle 4.16: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])

Jährlichkeit des Abflusses	Q95%	MQ	HQ1	HQ5	HQ10	HQ30	HQ100
Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	5,80	14,25	138	288	362	480	633

Abbildung 4.39 zeigt die Lafnitz beim Pegel in Eltendorf, Blick gegen die Fließrichtung, Abbildung 4.40 in Fließrichtung.

<sup>5</sup> keine terrestrische Vermessung des Sohlgefälles und keine Fließgeschwindigkeitsmessungen bei diesem Pegel durchgeführt



Abbildung 4.39: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahmedatum: 05. 10. 2014



Abbildung 4.40: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 05. 10. 2014

Im Folgenden wird aufgrund fehlender Daten (keine Vermessung des Sohlgefälles und keine eigenen Fließgeschwindigkeitsmessungen) davon abgesehen, eine Unterteilung in eine Sohl- und eine Böschungrauheit vorzunehmen. Aus diesem Grund wird mit den vorhandenen Daten vom Wasserportal Burgenland und ehyd lediglich ein „**Gesamt**“-  $k_{Sf}$ -Wert für unterschiedliche Wasserstände errechnet.

Abbildung 4.41 zeigt den **Pegelschlüssel** für die Lafnitz in Eltendorf. Für die Erstellung wurden die Monatsmaxima der Durchflüsse zwischen 1987 und 2011, sowie

die beiden Abflussereignisse am 05. 10. 2014 und am 22. 10. 2014 herangezogen. Leider konnte bei der Erstellung eines Pegelschlüssels nicht festgestellt werden, warum die vorliegenden Daten voneinander abweichen (zwei „Stränge“ sind zu erkennen). Es könnte sich dabei um das Phänomen der Durchflusshysterese handeln. Hilfreich zur Festlegung eines Pegelschlüssels waren jedenfalls die zwei aufgezeichneten Ereignisse aus dem Jahr 2014.

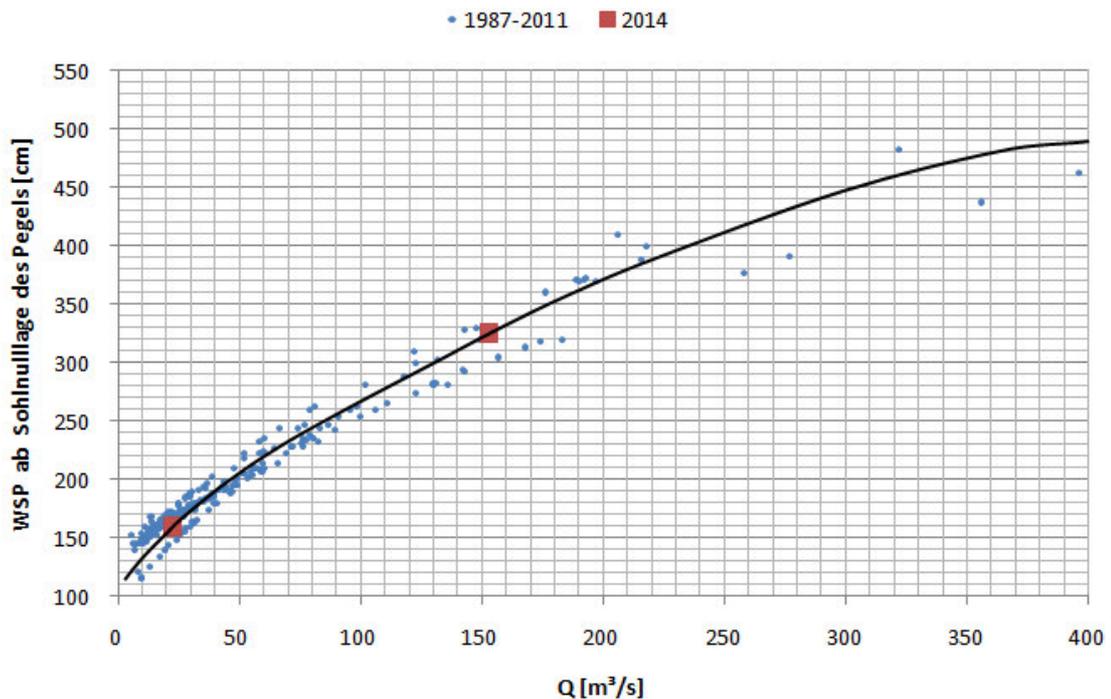


Abbildung 4.41: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Durchflusswerte (Monatsmaxima im Zeitraum von 1987-2011 und die aufgezeichneten Ereignisse am 06. 10. 2014 und am 22. 10. 2014) in Abhängigkeit vom Wasserstand

In Tabelle 4.17 sind die Strickler-Beiwerte (berechnet mithilfe der GMS-Formel) inkl. aller notwendigen Daten aufgelistet. Weil speziell bei Niederwasserverhältnissen die Genauigkeit der berechneten **Rauheitsbeiwerte** mit der **GMS-Gleichung** nicht gegeben ist (siehe dazu Abbildung 2.10), wird im Folgenden auch mithilfe der **DW-Gleichung** ein Strickler-Beiwert errechnet.

Tabelle 4.17: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Strickler-Beiwerte

	05.10.2014		mit Pegelschlüssel-Werten			22.10.2014	mit PS-Werten	
WSP =	160	cm	130	205	268	325	410	472
Q =	22.5	m <sup>3</sup> /s	10.0	50.0	100.0	153	250.0	350.0
A =	19.69	m <sup>2</sup>	11.14	32.99	51.59	72.14	110.76	142.89
v <sub>urspr.</sub> =	1.1	m/s	0.9	1.5	1.9	2.1	2.3	2.4
A <sub>Abzug</sub> =	0.00	m <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
v <sub>mittel</sub> =	1.1	m/s	0.9	1.5	1.9	2.1	2.3	2.4
Q <sub>tatsächlich</sub> =	22.5	m <sup>3</sup> /s	10.0	50.0	100.0	153.0	250.0	350.0
I <sub>E</sub> =	0.003		0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
U =	29.16	m	28.25	30.54	34.57	42.24	52.54	56.99
B <sub>0</sub> =	28.00	m	27.37	28.94	32.47	40.04	50.19	54.47
R <sub>Hy</sub> =	0.68	m	0.39	1.08	1.49	1.71	2.11	2.51
y =	0.70	m	0.41	1.14	1.59	1.80	2.21	2.62
<b>k<sub>St,GMS</sub> =</b>	<b>27.1</b>	<b>m<sup>1/3</sup>/s</b>	<b>30.5</b>	<b>26.3</b>	<b>27.1</b>	<b>27.1</b>	<b>25.1</b>	<b>24.2</b>
k <sub>s,ges</sub> /4*R <sub>Hy</sub> =	0.11		0.10	0.09	0.08	0.07	0.08	0.08
h <sub>Gr</sub> =	0.40	m	0.24	0.67	0.99	1.14	1.36	1.61
v <sub>Gr</sub> =	1.99	m/s	1.53	2.57	3.11	3.35	3.66	3.98
Fr =	0.44		0.45	0.45	0.49	0.50	0.49	0.48
y =	0.70	m	0.41	1.14	1.59	1.80	2.21	2.62
Re =	2.55E+06		1.17E+06	5.41E+06	9.56E+06	1.20E+07	1.57E+07	2.03E+07
B <sub>0</sub> / y =	39.81		67.25	25.39	20.44	22.22	22.74	20.76
f <sub>Trapez/R.</sub> =	0.74		0.74	0.74	0.83	0.83	0.83	0.83
λ =	0.122		0.115	0.111	0.093	0.089	0.097	0.098
<b>k<sub>s,ges,iterat.</sub> =</b>	<b>0.289</b>	<b>m</b>	<b>0.154</b>	<b>0.395</b>	<b>0.457</b>	<b>0.478</b>	<b>0.691</b>	<b>0.840</b>
[4], links =	2.866		2.947	3.006	3.271	3.345	3.204	3.189
[4], rechts =	2.868		2.948	3.007	3.266	3.344	3.205	3.185
Fehler =	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>k<sub>St,c+W</sub> =</b>	<b>29.1</b>	<b>m<sup>1/3</sup>/s</b>	<b>32.7</b>	<b>28.1</b>	<b>27.9</b>	<b>27.9</b>	<b>25.9</b>	<b>25.0</b>
Δk <sub>St</sub> =	2.03	m <sup>1/3</sup> /s	2.21	1.85	0.84	0.85	0.85	0.80

In Tabelle 4.17 ist zu erkennen, dass der **Unterschied** zwischen dem hydraulischen Radius **R<sub>Hy</sub>** und der **Wassertiefe y** vernachlässigbar klein ist. Für die Berechnung des k<sub>St</sub>-Wertes wird jedenfalls R<sub>Hy</sub> verwendet. Dieser Unterschied würde sich nur bei sehr kompakten Gerinnequerschnitten auswirken.

Abbildung 4.42 zeigt den Verlauf der k<sub>St</sub>-Werte und der Wasserspiegel in Abhängigkeit vom Durchfluss. Dabei wurden zur Erstellung des Pegelschlüssels die Maximalwerte der Durchflüsse in jedem Monat (Zeitraum 1987 – 2011) und die beiden Abflussereignisse aus dem Jahr 2014 herangezogen.

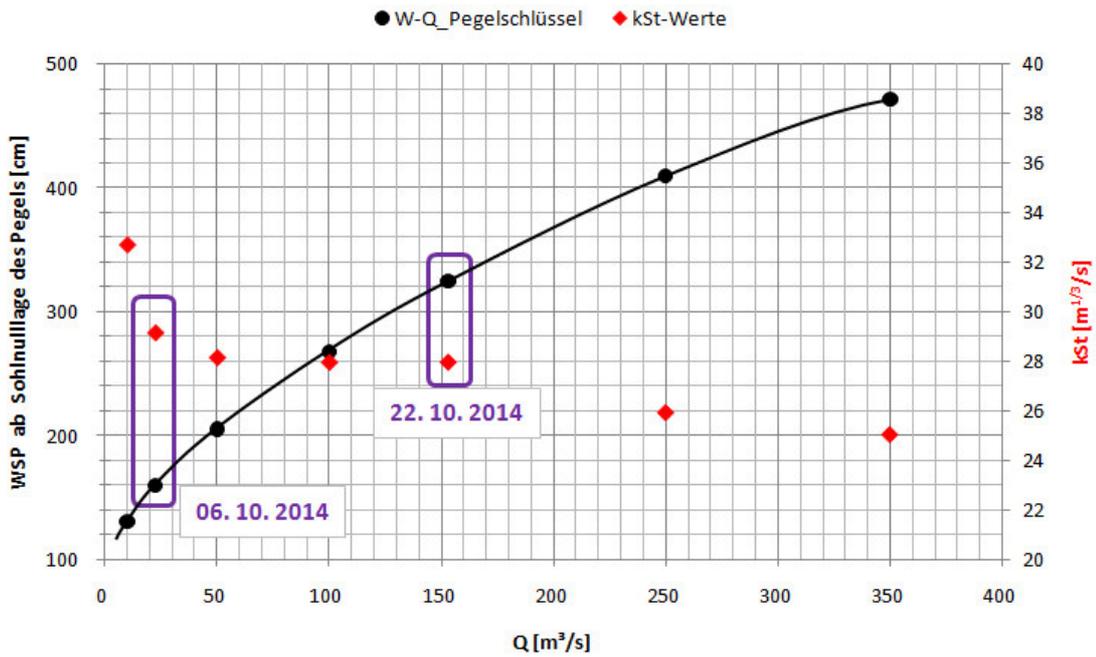


Abbildung 4.42: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Verlauf des  $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss

Aus Abbildung 4.42 geht hervor, dass mit zunehmenden Abflüssen bzw. Wasserspiegeln die  $k_{St}$ -Werte sinken. Während die Sohle eher glatt ist, hat die verkrautete Böschung bei höheren Wasserständen großen Einfluss auf den Fließwiderstand. Bei einem weiteren Anstieg des Durchflusses werden auch die angrenzenden Vorländer (bzw. Retentionsbereiche bei Hochwasser) mit geringer Wassertiefe überströmt. Ein weiteres Absinken der Strickler-Beiwerte kann beobachtet werden.

Abbildung 4.43 zeigt schematisch das Querprofil der Lafnitz in Eltendorf. Die mittleren Wassertiefen sind in Abhängigkeit des Durchflusses dargestellt und die berechneten Strickler-Beiwerte angegeben.

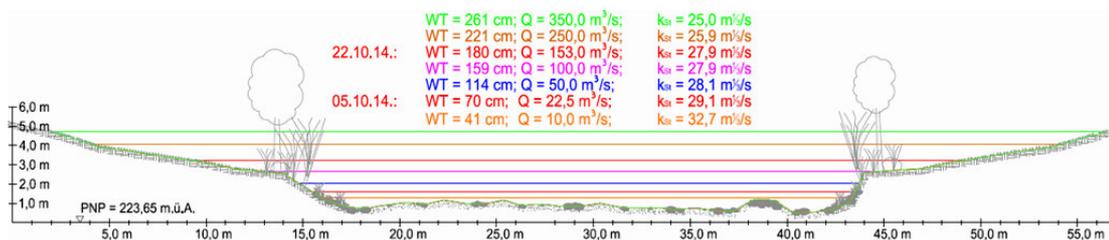


Abbildung 4.43: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der  $k_{St}$  - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q

## 5 Auswahl eines $k_{St}$ -Wertes mithilfe angeführter Untersuchungen

Im Folgenden wird anhand eines Beispiels gezeigt, wie die Auswahl eines Strickler-Beiwertes für ein in Kapitel 4 beschriebenes Gerinne funktioniert. Es wird aufgezeigt, wie schwierig die richtige Wahl eines  $k_{St}$ -Wertes trotz hilfreicher Abbildungen ist und wie sehr die ermittelten Werte voneinander abweichen können.

Für den **Tauchenbach in Altschlaining** (siehe Abbildung 5.1) wird der  $k_{St}$ -Wert abgeschätzt.



Abbildung 5.1: Tauchenbach in Altschlaining, Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014

Nach Tabelle 3.4 ergibt sich eine ganze Bandbreite von  $k_{St}$ -Werten:

- natürliche Flussbetten, Ufer verkräutet (nach [SCHRÖDER, W., 1994]):  
 $k_{St} = 30 - 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (bei Geschiebetrieb sinken angegebene Werte)
- kleinere natürliche Flüsse mit Hochwasser-Abflussbreiten  $< 30 \text{ m}$ , gleichmäßig gewunden, einige Mulden und Untiefen (nach [VEN TE CHOW, 1959]):  $k_{St} = 22 - 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Es fällt nicht leicht, den richtigen Rauheitsbeiwert angeben zu können. Es werden zusätzlich Abbildungen ähnlicher Gerinne aus Kapitel 3 zum Vergleich und Bestimmung eines korrekten  $k_{St}$ -Wertes herangezogen.



Abbildung 5.2: Natürliches Gewässer (Bach mit Wurzelgeflechten):  $k_{St} = 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 12)

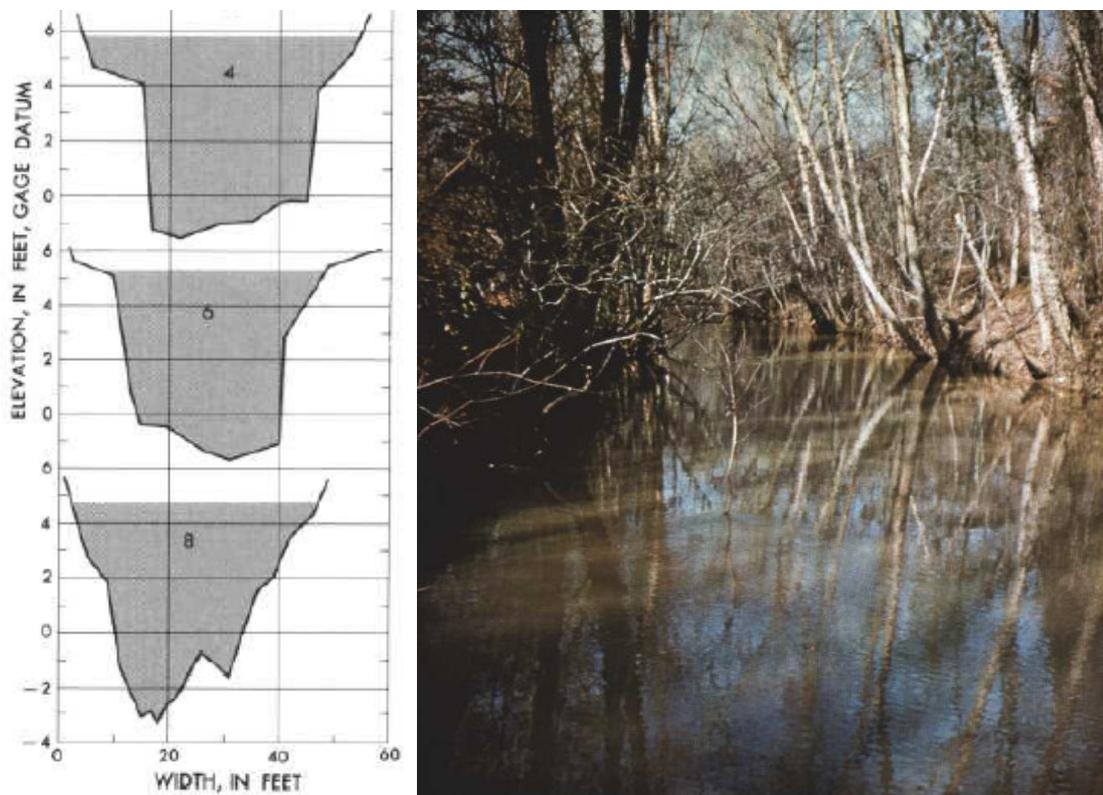
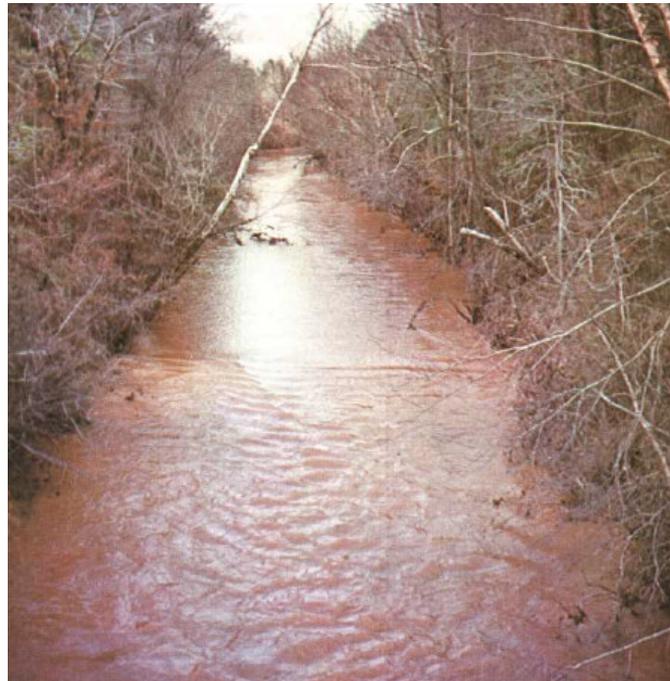
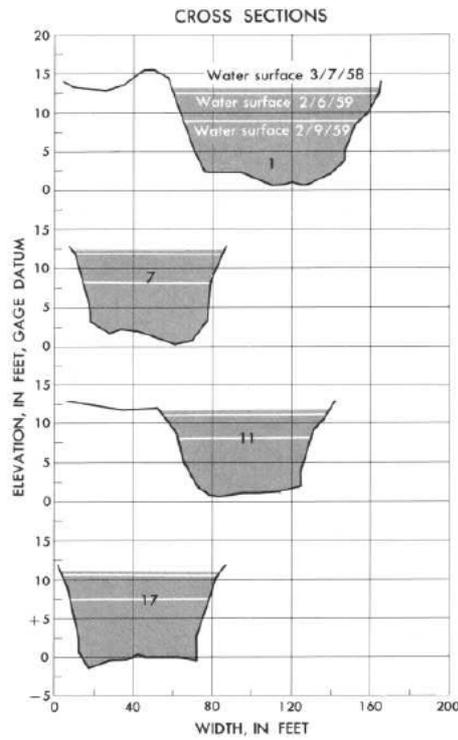


Abbildung 5.3: Murder Creek near Monticello, Ga.: Sohle aus Sand und Kies, Gefälle: 3‰ im Mittel:  $k_{St} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 130 ff.)



Section	Area (sq ft)	Top width (ft)	Mean depth (ft)	Hydraulic radius (ft)	Mean velocity (ft per sec)	Length (ft) between sections	Fall (ft) between sections
<b>Mar. 7, 1958</b>							
3.....	768	85	9.0	7.84	3.31	.....	.....
7.....	700	76	9.2	7.69	3.63	652	0.60
11.....	700	87	8.0	7.29	3.63	731	.58
14.....	761	80	9.5	8.36	3.34	495	.27
17.....	770	82	9.4	8.28	3.31	469	.36
<b>Feb. 6, 1959</b>							
3.....	700	81	8.8	7.65	3.20	.....	.....
7.....	640	74	8.7	7.40	3.50	652	0.60
11.....	625	83	7.6	6.80	3.58	731	.58
14.....	700	76	9.1	7.90	3.20	495	.27
17.....	715	79	9.1	8.00	3.13	469	.21
<b>Feb. 9, 1959</b>							
3.....	435	73	6.1	5.55	2.90	.....	.....
7.....	405	64	6.3	5.50	3.11	652	0.48
11.....	375	69	5.6	5.00	3.36	731	.60
14.....	450	64	6.5	5.85	2.80	495	.33
17.....	455	69	6.6	5.75	2.77	469	.30

Abbildung 5.4: Tobesofkee Creek near Macon, Ga.: Sohle aus Sand und Kies und einigen größeren Steinen, Gefälle: 0,7 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 23 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 07.05. 58,  $k_{St} = 24 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 06.02. 59 und  $k_{St} = 26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 09.02. 59 (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 94 ff.)



Abbildung 5.5: Stark verwachsener Querschnitt des Russbaches im Herbst 2004 -  $k_{St}$ -Wert = **18 bis 21  $m^{1/3}/s$**  (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 43)



Abbildung 5.6: Querschnitt des Russbaches im Frühjahr 2005 – auf Stock geschnittener Böschungsbewuchs -  $k_{St}$ -Wert = **28 bis 33  $m^{1/3}/s$**  (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 45)

Die  $k_{St}$ -Werte nach vorangestellten Abbildungen reichen von **18 bis 33  $m^{1/3}/s$** . Es wird schnell klar, dass bei dieser Schätzmethode ebenfalls ein hoher Wissensstand des Anwenders vorausgesetzt werden muss.

Der von [KNAUF, 2003] bestimmte  $k_{St}$ -Wert von  $28 m^{1/3}/s$  (siehe Abbildung 5.2) stimmt mit den **Ergebnissen** für den **Tauchenbach** gut überein (je nach Durchfluss ergibt sich ein **Strickler-Beiwert** von **23 bis 31  $m^{1/3}/s$** ). Auch optisch ähneln das Gerinne in Abbildung 5.2 und der Tauchenbach einander sehr. Bei einem Durchfluss von 7 bis  $8 m^3/s$  ergibt sich für den Tauchenbach in Altschlaining genau der  $k_{St}$ -Wert von  $28 m^{1/3}/s$ .

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Bei vielen hydraulischen Berechnungen im Flussbau ist es unumgänglich, Rauheits- bzw. Widerstandsbeiwerte für das Gerinne festzulegen. Die Wichtigkeit einer korrekten Bestimmung wird oftmals unterschätzt.

Obwohl es nach dem aktuellen Wissensstand eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Bestimmung von Rauheitsbeiwerten gibt, fällt es in der Praxis trotzdem schwer einen richtigen Wert zu finden (v.a. für naturnahe Gerinne). Außerdem sind viele Bestimmungsmethoden nur im Labor möglich. Es soll mit dieser Arbeit möglich sein, innerhalb kurzer Zeit für ähnliche Gerinne einen richtigen  $k_{St}$ -Wert angeben zu können.

Im ersten Teil der Arbeit wurden bereits durchgeführte Untersuchungen und deren Ergebnisse zusammengestellt.

Weiters wurden für unterschiedliche Gerinne im Nahbereich von Pegelstellen Strickler-Beiwerte ( $k_{St}$ -Werte) ermittelt. Außerdem wurde mit dem Verfahren nach INDLEKOFER eine Berechnung des Rauheitsbeiwertes für Sohle und Böschung durchgeführt.

Zuletzt wurde für den Tauchenbach bei Altschlaining mithilfe der zusammengestellten Untersuchungen ein  $k_{St}$ -Wert abgeschätzt. Dieser konnte mit den errechneten Werten verglichen werden. Es konnte festgestellt werden, dass sich trotz hilfreicher Abbildungen die Auswahl eines Strickler-Beiwertes als nicht einfach gestaltet.

Für eine Vervollständigung bzw. **Erstellung eines Katalogs mit Rauheitsbeiwerten** wären **weitere Erhebungen** notwendig:

- für eine Überprüfung bzw. Aktualisierung der Pegelschlüssel: weitere Fließgeschwindigkeitsmessungen auch bei größeren Durchflüssen und unterschiedlichen Jahreszeiten
- für die Wahl eines Rauheitsbeiwertes für die Sohle: detaillierte Aufnahmen bzw. Untersuchungen der Sohle
- ev. Aufnahme des Wasserspiegelgefälles bei unterschiedlichen Wasserständen und Durchflüssen (mit einem Differenzdruckmessgerät z.B.)

Weitere Untersuchungen könnten sich damit befassen, ob, und wie stark sich **jahreszeitliche Veränderungen des Bewuchses** auf die Abflusskapazität auswirken (Vergleiche Strickler-Beiwerte für Sommer und Winter). Außerdem könnte behandelt werden, wie sich eine unterschiedliche **Gerinnepflege** (Rückschnitt der Sträucher und Bäume, sowie Mahd der Böschungen) auf den Rauheitsbeiwert bzw. Durchfluss auswirkt (ähnlich der bereits durchgeführten Arbeiten von [PAUGAM, 2008] und [DELGYANSKA, 2012]).

Zukünftige Arbeiten könnten sich weiters mit der Untersuchung eines „**Gesamtk<sub>St</sub>-Wertes**“ für **Fischaufstiegshilfen** befassen. Es wäre dann möglich, bei Variation des Gefälles für ähnliche Systeme den Durchfluss bzw. die Fließgeschwindigkeit zu ermitteln.

## 7 Anhang

### 7.1 Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

A	durchflossener Querschnitt	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>Abzug</sub>	Fläche, wo v = 0 m/s ist – bei eigenen Geschwindigkeitsmessungen berücksichtigt	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>Böschung</sub>	Teilfläche der Böschung	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>Sohle</sub>	Teilfläche der Sohle	[m <sup>2</sup> ]
B <sub>0</sub>	Wasserspiegelbreite	[m]
DW	DARCY-WEISBACH	[-]
F <sub>G</sub>	Gewichtskraft	[N]
F <sub>R</sub>	Reibungskraft	[N]
Fr	Froudezahl	[-]
f bzw. f <sub>Trapez/R</sub>	Formbeiwert	[-]
GMS	GAUCKLER-MANNING-STRICKLER	[-]
$\bar{h}$	mittlere Wassertiefe (oder y bzw. WT)	[m]
h <sub>E</sub>	Energiehöhe	[m]
h <sub>E,min</sub>	Minimum der Energiehöhe	[m]
h <sub>Gr</sub>	Grenzwassertiefe	[m]
HQ	Durchfluss bei Hochwasser	[m <sup>3</sup> /s]
h <sub>Sch</sub>	Wassertiefe bei schießendem Abfluss	[m]
h <sub>Str</sub>	Wassertiefe bei strömendem Abfluss	[m]
HW	Hochwasser oder Wasserstand/ -spiegel bei Hochwasser (W – Wasserstand bzw. WSP – Wasserspiegel)	[cm]
I <sub>E</sub>	Energieliniengefälle	[-] bzw. [%]
I <sub>E,Mittel</sub>	mittleres Energieliniengefälle	[-] bzw. [%]
I <sub>S</sub>	Sohlgefälle	[-] bzw. [%]
I <sub>W</sub>	Wasserspiegelgefälle	[-] bzw. [%]
k <sub>S</sub>	äquivalente Sandrauheit	[m]
k <sub>S,Bö</sub>	äquivalente Sandrauheit der Böschung	[m]
k <sub>S,ges.</sub>	äquivalente Sandrauheit für das gesamte Profil	[m]
k <sub>S,ges.,Iterat.</sub>	äquivalente Sandrauheit für das gesamte Profil, durch Iteration berechnet	[m]

$k_{S,S}$ bzw. $k_{S,Sohle}$	äquivalente Sandrauheit der Sohle	[m]
$k_{St,Bö.,It.}$	durch Iteration ermittelter Strickler-Beiwert für die Böschung	[m <sup>1/3</sup> /s]
$k_{St,Böschung}$	Strickler-Beiwert für die Böschung	[m <sup>1/3</sup> /s]
$k_{St,COWAN}$	Strickler-Beiwert für das gesamte Profil nach COWAN	[m <sup>1/3</sup> /s]
$k_{St,C+W}$	Strickler-Beiwert für das gesamte Profil nach DARCY-WEISBACH und COLEBROOK und WHITE	[m <sup>1/3</sup> /s]
$k_{St,Gesamt}$	Strickler-Beiwert für das gesamte Profil	[m <sup>1/3</sup> /s]
$k_{St,GMS}$	Strickler-Beiwert nach der empirischen Fließformel nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER	[m <sup>1/3</sup> /s]
$k_{St,Sohle}$	Strickler-Beiwert für die Sohle	[m <sup>1/3</sup> /s]
$k_{St,Soll}$ bzw. $k_{St,ges.,Vorgabe}$	Anfangs-/ Vorgabe- Strickler-Beiwert	[m <sup>1/3</sup> /s]
$\Delta k_{St}$	Differenz zwischen Strickler-Beiwerten nach GMS und DW	[m <sup>1/3</sup> /s]
$l$	Länge des betrachteten Fließabschnittes	[m]
$m$	Mäandrierungsgrad nach COWAN	[-]
$n_i$	Einflussfaktoren nach COWAN	[s/m <sup>1/3</sup> ]
$Q$	Durchfluss	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{tatsächlich}$	tatsächlicher Durchfluss	[m <sup>3</sup> /s]
$Re$	Reynolds-Zahl	[-]
$R_{Hy}$	hydraulischer Radius	[m]
$U$ bzw. $l_u$	benetzter Umfang	[m]
$U_{Böschung}$	benetzter Umfang der Böschung	[m]
$U_{Sohle}$	benetzter Umfang der Sohle	[m]
$v$	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{Gr}$	Grenz(fließ)geschwindigkeit	[m/s]
$v_{Mittel}$	tatsächliche, mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{Sch}$	Fließgeschwindigkeit bei schießendem Abfluss	[m/s]
$v_{Str}$	Fließgeschwindigkeit bei strömendem Abfluss	[m/s]
$v_{urspr.}$	Fließgeschwindigkeit vor Berücksichtigung des Randeinflusses von Sohle und Böschungen	[m/s]
$WSP$	Wasserspiegel (hier zumeist ab dem Pegelnullpunkt)	[cm]
$WT$	Wassertiefe	[cm]
$y$	mittlere Wassertiefe (oder $\bar{h}$ bzw. WT)	[m]
$\lambda$	Widerstandsbeiwert	[-]

---

$\kappa$	Korrekturfaktor für die Umrechnung von $k_{S,i}$ auf $k_{St,i}$	[-]
$\nu$	kinematische Viskosität	[m <sup>2</sup> /s]
$\tau_0$	Wandschubspannung	[N/m <sup>2</sup> ]

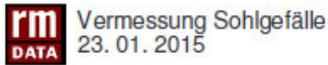
## 7.2 Weiterführende Literatur

Als Grundlage und Motivation für diese Arbeit dienten u.a. folgende Untersuchungen (hierbei wurden zumeist für unterschiedliche Wasserstände und Durchflüsse Rauheitsbeiwerte ermittelt):

- [BARNES, 1967] Barnes, Harry H., Jr.: Roughness Characteristics of Natural Channels. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849. Washington: United States Government Printing Office, 1967.
- [VEN TE CHOW, 1959] Illustrations of Channels with Various Roughness (Chow, Ven Te: Open-channel hydraulics. New York, NY [u.a.]: McGraw-Hill, 1959. S. 114 - 123)
- [DVWK, 1990] Hrsg.: Dt. Verb. für Wasserwirtschaft u. Kulturbau e. V. (DVWK): Hydraulische Methoden zum Erfassen von Rauheiten. Zsgest. von Ralph C. M. SCHRÖDER. – Hamburg, Berlin, Parey. 1990.
- [FASKEN, 1963] Fasken, G.B., 1963, Guide for selecting roughness coefficient “n” values for channels: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Lincoln, Nebr., 24 p. plus appendixes.
- Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Deutschland:
  - [LfU 1, 2002] Hydraulik naturnaher Fließgewässer: Teil 1- Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren. 1. Auflage; Karlsruhe, 2002.
  - [LfU 2, 2002] Hydraulik naturnaher Fließgewässer: Teil 2- Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen. 1. Auflage; Karlsruhe, 2002.
  - [LfU 3, 2002] Hydraulik naturnaher Fließgewässer: Teil 3- Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg. 1. Auflage; Karlsruhe, 2002.
- [KNAUF, 2003] basierend auf: Knauf, D.: Rauheitsbeiwerte - Zusammenhang zwischen Rauheitsbeiwerten nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER und den äquivalenten Rauheitsbeiwerten nach Prandtl-Colebrook im hydraulisch rauen Bereich. Wasser u. Abfall 4-5, 2003. <http://www.psw-knauf.de/download/Gewaesser-Rauheiten.pdf>, Zugriff am 24. 11. 2014

- [LAND & WATER AUSTRALIA, 2009] Land & Water Australia, Australian Government: An Australian Handbook of Stram Roughness Coefficients. Canberra: 2009.
- [PHILLIPS, 1998] Jeff V. Phillips and Todd L. Ingersoll: Verification of Roughness Coefficients for Selected Natural and Constructed Stream Channels in Arizona (U.S. Geological Survey Professional Paper 1584). Prepared in cooperation with the Flood Control District of Maricopa County. Denver, 1998.
- [PHILLIPS, 2006] Jeff V. Phillips and Todd L. Ingersoll: Verification of Roughness Coefficients for Selected Natural and Constructed Stream Channels in Arizona (U.S. Geological Survey Professional Paper 1584). Prepared in cooperation with the Flood Control District of Maricopa County. Denver, 2006.
- [SOONG, 2012] Soong, David T., Prater, Crystal D., Halfar, Teresa M., and Wobig, Loren A., 2012, Manning's roughness coefficient for Illinois streams: U.S. Geological Survey Data Series 668, 14 p.
- [SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001] Spreafico, M.; Hodel, H.P.; Kaspar, H.: Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern. Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque Nr. 1. Bern: 2001.

### 7.3 Vermessung Sohlgefälle am 23. 01. 2015



#### Projekteinstellungen

<b>Punkte</b>		
MC zu Punkten übernehmen:		Ein
Autom. Meridianstreifen Trafo:		Aus
Additionskonstanten		Y = 0 m
		X = 0 m
		H = 0 m
<b>Messungen</b>		
Zwei Kreislagen		Aus
Max. Klaffung der Kreislagen		Richtung = 10
		Zenitdistanz = 20
DS ohne ZD horizontal:		Aus
<b>Mittlere Fehler</b>		
Richtungen		10.0 cc
Zenitdistanzen		10.0 cc
Distanzen		3.0 mm + 2.0 ppm
Nivellement		0.2 mm
Mittl. Zentrierfehler Lage		1.0 mm
Mittl. Zentrierfehler Höhe		1.0 mm
Fehlergrenze	Lage-Mittelung:	0.0100
Fehlergrenze	Höhen-Mittelung:	0.0100
Gewicht für trig. Höhenber. ab		50.0000 m
Gewicht für Satzori. bis		1500.0000 m

**Reduktionen**

Streckenreduktion: Aus  
 Meteorologische Reduktion: Aus  
 Reduktion auf Bezugshöhe: Aus  
 mittlere Höhe: 300.0000 m  
 Bezugshöhe: 0.0000 m  
 Mittlere Geoidundulation: 0.0000 m  
 Reduktion in die Rechenebene: Aus

Streckenreduktion in die Horizontale: Ein  
 Flächenreduktion bei Flächenber: Aus  
 koaxiale Reduktion: Aus  
 0 mm  
 reflektorlose koax. Reduktion: Aus

Refraktion: Ein  
 Koeffizient: 0.130  
 Höhenfaktor: 0.000000000

Richtungsreduktion: Aus  
 Meridiankonvergenz: Aus

**Bezugssystem**

Projektionssystem: Österreich M34  
 Additionskonstante für Y: 0 m  
 Gesamt-Mstb: 1.000000000  
 Additionskonstante für X: 5000000 m  
 mittlerer Krümmungsradius: 6379400 m  
 Typ: Gauß-Krüger

Meridian: 34.00000000 Ferro

Bezugsellipsoid: Bessel  
 Große Halbachse: 6377397.1550 m  
 1/Abplattung: 299.152819

## Messdaten

Standpunkte	Zielpunkte	zH	R	Z	Ds	MC	
PP100	Satz	1	Ori =	iH =	1.500		
		PP101	1.500	0.0000	88.6764	1008	
		101	1.500	285.0869	101.4306	62.4224	1
		102	1.500	284.0487	101.4903	62.0126	1
		103	1.500	284.9814	101.6669	51.4602	1
		104	1.500	285.6481	102.0893	40.4867	1
		105	1.500	282.9311	102.9014	29.7225	1
		106	1.500	280.2632	104.0329	19.9948	1
		107	1.500	260.6710	108.6684	9.5697	1
		108	1.500	180.1088	114.4563	5.5194	1
		109	1.500	120.2531	106.0790	12.8515	1
		110	1.500	113.4363	106.0483	12.2879	1
		111	1.500	109.7155	103.4277	22.2466	1
		112	1.500	111.7801	103.4558	22.2911	1
		113	1.500	106.2688	102.2612	30.8189	1
		114	1.500	108.2604	102.4056	30.8929	1
		115	1.500	106.8027	101.7055	42.1653	1
		116	1.500	105.1111	101.3511	51.5102	1
		117	1.500	106.0786	101.3695	51.4241	1
PP200	Satz	1	Ori =	iH =	1.500		
		PP201	1.500	0.0000	91.2697		1
		200	1.500	299.1493	101.0034	51.4429	1
		201	1.500	297.5089	101.0452	51.3477	1
		202	1.500	299.6249	101.3186	39.7949	1
		203	1.500	298.2262	101.3111	40.0033	1
		204	1.500	301.7576	101.6863	30.0212	1
		205	1.500	307.1584	102.7197	19.8015	1
		206	1.500	301.7346	102.5989	19.4270	1
		207	1.500	311.9988	105.0824	9.9315	1
		208	1.500	319.0307	104.9026	10.3331	1
		209	1.500	306.4106	105.3954	9.8226	1
		210	1.500	396.8094	113.2149	3.3680	1
		211	1.500	78.5108	104.5273	9.8253	1
		212	1.500	69.5222	104.3663	10.4899	1
		213	1.500	87.5000	102.2609	19.9641	1
		214	1.500	83.9583	102.1975	20.0173	1
		215	1.500	92.0984	101.3483	30.7805	1
		216	1.500	86.3490	101.2596	31.2174	1
		217	1.500	92.0081	101.0648	40.3271	1
		218	1.500	87.8767	100.9137	40.3630	1
		219	1.500	91.1409	100.8559	49.6911	1
		220	1.500	87.9591	100.6760	49.6792	1
PP300	Satz	1	Ori =	iH =	1.500		
		PP301	1.500	0.0000	100.9953		1
		301	1.500	303.6073	107.8996	28.4631	1
		302	1.500	304.9952	108.0173	27.7492	1
		303	1.500	303.5207	109.1649	24.1938	1
		304	1.500	306.8712	112.4929	17.8072	1
		305	1.500	303.3149	112.4967	17.9128	1
		306	1.500	299.4349	112.6339	17.9683	1
		307	1.500	311.9240	123.7059	8.6269	1
		308	1.500	302.7253	125.1100	8.3031	1
		309	1.500	291.4995	126.2190	7.9216	1
		310	2.600	103.3827	126.5101	5.2009	1
		311	2.600	89.8726	124.9328	5.3591	1
		312	2.600	73.1788	122.5174	5.7983	1

			313	1.500	106.1523	117.4464	12.3325	1
			314	1.500	98.9589	117.1038	12.4815	1
			315	1.500	107.5862	108.7896	20.2038	1
			316	1.500	101.6074	108.6550	20.3405	1
			317	1.500	105.4315	106.7744	26.2576	1
PP400	Satz	1		Ori =		iH =	1.500	
			PP401	1.500	0.0000	105.7067		1
			401	1.500	96.8682	101.8971	50.2003	1
			402	1.500	94.2398	101.8294	50.2969	1
			403	1.500	94.2266	102.1929	40.0339	1
			404	1.500	91.6831	102.2338	40.4639	1
			405	1.500	86.4481	102.6530	28.3693	1
			406	1.500	90.1925	102.7676	27.5257	1
			407	1.500	84.4540	103.8385	19.7648	1
			408	1.500	79.3162	103.5467	20.0140	1
			409	1.500	70.4461	108.4574	9.9043	1
			410	1.500	62.9180	107.0818	10.8336	1
			411	1.500	399.7857	116.2921	4.7391	1
			412	1.500	1.0717	111.7216	6.1040	1
			413	1.500	338.4835	106.7417	10.3562	1
			414	1.500	327.3674	107.4475	9.7120	1
			415	1.500	315.3945	103.5570	19.0134	1
			416	1.500	319.6860	103.5221	19.3374	1
			417	1.500	314.4287	102.3235	29.1971	1
			418	1.500	312.2413	102.3509	29.0945	1
			419	1.500	318.2677	102.4857	29.2975	1
			420	1.500	311.2925	101.7175	39.8156	1
			421	1.500	312.6018	101.7663	40.3414	1
			422	1.500	308.3735	101.1948	51.2420	1
			423	1.500	307.3204	101.0721	50.3543	1

## Koordinatenverzeichnis

Punkte Code	Y[m]	X[m]	H[m]
PP100	100.000	100.000	100.000
PP200	200.000	200.000	100.000
PP300	300.000	300.000	100.000
PP400	400.000	400.000	100.000
101	39.298	85.514	98.598
102	39.940	84.628	98.549
103	49.982	87.976	98.653
104	60.559	90.955	98.672
105	71.369	92.134	98.646
106	80.997	93.912	98.734
107	92.271	94.508	98.701
108	101.653	94.883	98.757
109	112.151	95.998	98.775
110	111.961	97.437	98.834
111	121.956	96.623	98.803
112	121.878	95.905	98.791
113	130.650	96.972	98.906
114	130.611	96.006	98.833
115	141.910	95.505	98.871
116	151.333	95.870	98.907
117	151.178	95.098	98.894
200	148.568	199.313	99.189
201	148.699	197.992	99.157
202	160.214	199.766	99.176
203	160.021	198.886	99.176
204	170.001	200.828	99.205
205	180.341	202.220	99.154
206	180.596	200.529	99.207
207	190.275	201.855	99.208
208	190.154	203.034	99.205
209	190.262	200.984	99.169
210	199.835	203.292	99.306
211	209.247	203.246	99.302
212	209.289	204.821	99.281
213	219.568	203.892	99.291
214	219.374	204.988	99.309
215	230.537	203.810	99.348
216	230.496	206.641	99.382
217	240.004	205.049	99.326
218	239.629	207.639	99.421
219	249.206	206.892	99.332
220	248.791	209.340	99.473
301	271.801	301.600	96.477
302	272.555	302.158	96.515
303	276.093	301.323	96.529
304	282.636	301.881	96.528
305	282.455	300.914	96.506
306	282.385	299.844	96.458
307	292.105	301.496	96.861
308	292.341	300.328	96.809
309	292.805	299.034	96.829
310	304.750	299.747	96.796
311	304.891	300.785	96.854
312	304.964	302.224	96.892
313	311.817	298.854	96.662
314	312.032	300.197	96.687
315	319.870	297.621	97.219
316	320.146	299.491	97.243
317	326.014	297.775	97.211
401	450.117	402.468	98.504
402	450.070	404.543	98.555
403	439.846	403.623	98.621

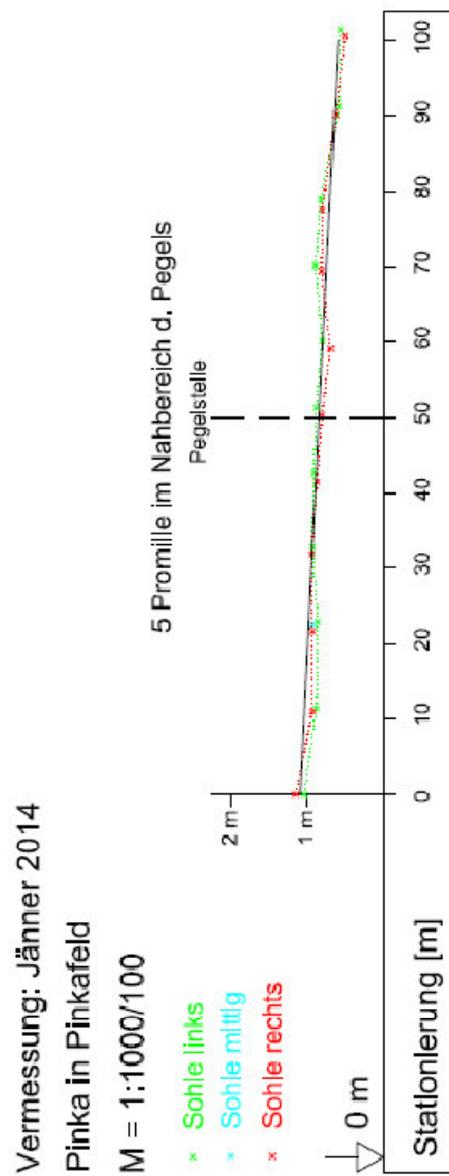
---

404	440.094	405.268	98.581
405	427.705	405.988	98.818
406	427.174	404.220	98.804
407	419.144	404.770	98.809
408	418.938	406.379	98.886
409	408.778	404.395	98.688
410	408.991	405.923	98.797
411	399.985	404.585	98.800
412	400.101	406.000	98.882
413	391.527	405.853	98.905
414	391.232	404.020	98.866
415	381.569	404.546	98.938
416	381.608	405.876	98.931
417	371.568	406.557	98.935
418	371.461	405.556	98.926
419	371.922	408.286	98.856
420	360.823	407.023	98.926
421	360.462	407.930	98.881
422	349.210	406.719	99.039
423	349.985	405.777	99.152

## 7.4 Längsschnitte der Sohlen in den Nahbereichen der Pegelstellen

Das Sohlgefälle wurde ohne Bezug zu einer Absoluthöhe erfasst (es ging lediglich um die Feststellung des Gefälles im Pegelnahbereich).

### 7.4.1 Pinka beim Pegel in Pinkafeld (M = 1:1000/100 – 10-fach überhöht)



7.4.2 Pinka beim Pegel in Oberwart (M = 1:1000/100 – 10-fach überhöht)

Vermessung: Jänner 2014

Pinka in Oberwart

M = 1:1000/100

4 Promille m Nahbereich d. Pegels

Pegelstelle

2 m

1 m

x Schie mittig

x Schie rechts

▽ 0 m

Stationierung [m]

110

100

90

80

70

60

50

40

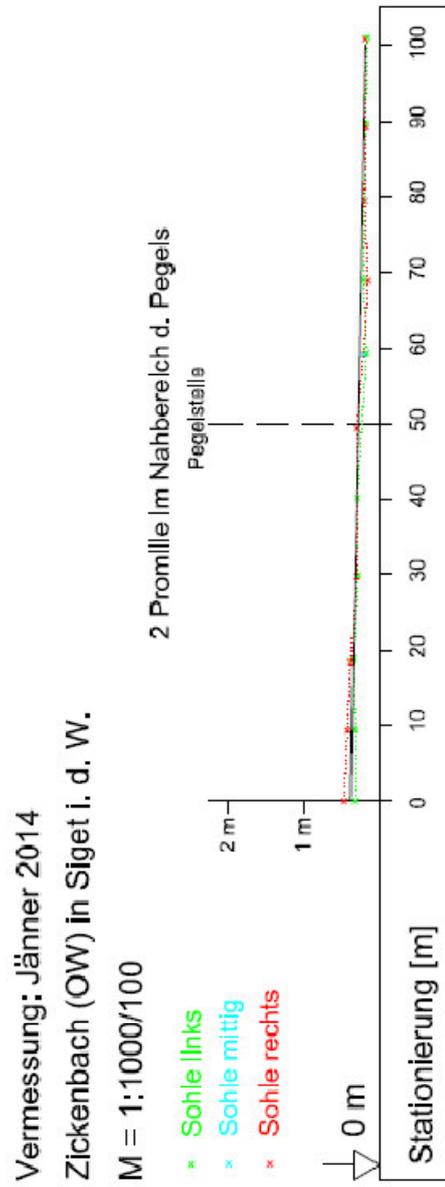
30

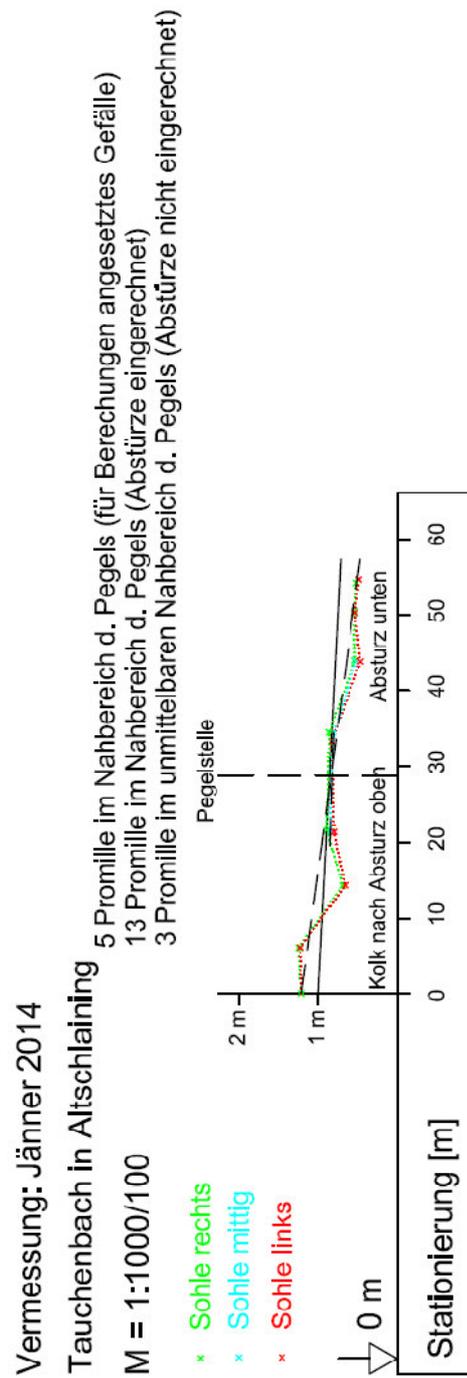
20

10

0

7.4.3 Zickenbach beim Pegel in Siget in der Wart (M = 1:1000/100 – 10-fach überhöht)



7.4.4 Tauchenbach beim Pegel in Altschlaining (M = 1:1000/100 – 10-fach überhöht)

## 7.5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Querschnitt eines Flussprofils (entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 4)	3
Abbildung 2.2: Geschwindigkeitsverteilungen von Gerinneströmungen (entnommen aus [FREIMANN, 2014], S. 40)	6
Abbildung 2.3: Formen der Ausbreitung von Oberflächenwellen in offenen Gerinnen bei unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit (entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S. 268)	7
Abbildung 2.4: Verlauf der Energiehöhe (entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S. 268)	7
Abbildung 2.5: Querschnitt und Längsschnitt eines offenen Gerinnes – zur Ableitung der Fließformel (entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S. 240)	9
Abbildung 2.6: Moody-Diagramm für Gerinneströmungen: Reibungsbeiwert $\lambda$ als Funktion der Reynoldszahl $Re$ und der relativen Rauheit $kS/(4 * RH_y)$ (entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 21)	12
Abbildung 2.7: Formen des hydraulischen Verhaltens: hydraulisch rauher Zustand (entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S. 175)	13
Abbildung 2.8: Formbeiwert $f$ als Funktion des Verhältnisses von Wassertiefe $y$ zu Sohlenbreite $B$ für Trapezgerinne (nach [BOCK, 1966] und [HEY, 1979]; entnommen aus [LfU 2, 2002], S. 51)	14
Abbildung 2.9: Formbeiwert $f$ als Funktion des Verhältnisses von Wassertiefe $y$ und Sohlenbreite $B$ für Rechteckgerinne (nach [SÖHNGEN, 1987] sowie [HEY, 1979], mit $x$ markiert und [AIGNER, 1994], mit $\square$ markiert – entnommen aus [LfU 2, 2002], S. 52)	14
Abbildung 2.10: Vergleich des Reibungsbeiwertes $\lambda$ für das hydraulisch raue Regime mit der Abschätzung nach der GMS-Formel (entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 118)	18
Abbildung 2.11: Zusammenhang zwischen $k_S$ und $k_{St}$ (nach [DIN EN 752-4, 1997], entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 3)	20
Abbildung 2.12: Gerinne mit Teilflächenzuordnung (nach [EINSTEIN, 1934] und [HORTON, 1933], entnommen aus [BOLLRICH, 2013], S. 250)	21
Abbildung 2.13: Überlagerungsmethode nach [INDLEKOFER, 2003] (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 40)	22
Abbildung 2.14: Ein größerer, schwach mäandrierender Bach mit einer feinkiesigen Sohle und stärkerem Böschungsbewuchs, der keinen natürlichen Lauf mehr aufweist (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 47)	25
Abbildung 2.15: Bach mit einer Sohle aus Erde und starkem Uferbewuchs (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 49)	25
Abbildung 2.16: Durchflusshysterese (entnommen aus [GEODZ, 2014], Zugriff am 14. 02. 2015)	26
Abbildung 2.17: Variation des $k_{St}$ -Wertes von Flüssen mit unregelmäßigen Fließquerschnitten (entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 27)	26
Abbildung 2.18: Variation des $k_{St}$ -Wertes von Flüssen mit unregelmäßigen Fließquerschnitten (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 105)	27
Abbildung 2.19: Abflusskurven für ein Gerinne im physikalischen Modellversuch mit stark von Vegetation besetztem Vorland (nach [EVERS, 1983], entnommen aus [NAUDASCHER, 1992], S. 236)	28
Abbildung 2.20: Sohlenformen in alluvialen Gerinnen – Froudezahl zunehmend von $a$ nach $f$ (entnommen aus [NAUDASCHER, 1992], S. 242)	29

- Abbildung 2.21: Einfluss der veränderlichen Sohlenform auf (a) die Sohlenschubspannung  $\tau_0$  für eine konstante Tiefe  $y$  und (b) die Wasserstandslinie für den Hochwasserabfluss (entnommen aus [NAUDASCHER, 1992], S. 243) 29
- Abbildung 3.1: links (Gerinne aus Ton bis Feinsand):  $k_{St} = 56 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (Gerinne aus schluffigem Ton):  $k_{St} = 42 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.) 34
- Abbildung 3.2: links (Gerinne, im Fels ausgehoben; oberer Bereich der Böschung: Weiden, unterer Teil: Beton):  $k_{St} = 38 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (Gerinne, grobkiesiges Sohlmaterial):  $k_{St} = 36 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.) 34
- Abbildung 3.3: links (Erdkanal mit alluvialen Bestandteilen, Böschung mit Gras bewachsen):  $k_{St} = 34 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (naturnahes Gerinne, Sohle aus Ton und Lehm mit eher unregelmäßiger Böschung):  $k_{St} = 29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.) 34
- Abbildung 3.4: links (Gerinne, Sohle aus Ton und sandigem Lehm, Querschnitt und Böschung unregelmäßig):  $k_{St} = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (Graben, Sohle und Böschung unregelmäßig, stark verwachsen mit Weiden und größeren Bäumen):  $k_{St} = 17 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.) 35
- Abbildung 3.5: links (Gerinne, Sohle aus Ton und Lehm, Sohle und Böschung stark verwachsen):  $k_{St} = 13 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; rechts (natürliches Gerinne, unebene Sohle aus sandigem Ton, unregelmäßige Böschung, viele Wurzeln, Sträucher und Bäume im Gerinne):  $k_{St} = 7 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [VEN TE CHOW, 1959], S. 115 ff.) 35
- Abbildung 3.6: Indian Fork below Atwood Dam, near New Cumberland, Ohio: Sohle aus Ton und Schluff hauptsächlich, Gefälle: ca. 0,3 ‰:  $k_{St} = 38 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 14 ff.) 36
- Abbildung 3.7: Champlin Creek near Colorado City, Tex.: Sohle aus Fein- und Grobkies, sowie Steinanteilen, Gefälle: 3,6 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 37 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 18 ff.) 37
- Abbildung 3.8: Salt Creek at Roca, Nebr.: Sohle aus Ton bis Sand, Gefälle: 0,6 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 38 ff.) 37
- Abbildung 3.9: Etowah River near Dawsonville, Ga.: Sohle aus Sand und Kies und umgestürzten Bäumen, Gefälle: 0,6 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 24 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 22. 01. 59,  $k_{St} = 26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 13. 02. 59 und  $k_{St} = 29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 14. 02. 59 (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 66 ff.) 38
- Abbildung 3.10: Tobesofkee Creek near Macon, Ga.: Sohle aus Sand und Kies und einigen größeren Steinen, Gefälle: 0,7 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 23 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 07. 05. 58,  $k_{St} = 24 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 06. 02. 59 und  $k_{St} = 26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  am 09. 02. 59 (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 94 ff.) 39
- Abbildung 3.11: Murder Creek near Monticello, Ga.: Sohle aus Sand und Kies, Gefälle: 3 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 130 ff.) 40
- Abbildung 3.12: Rolling Fork near Boston, Ky.: Sohle aus Ton und Schluff, Gefälle: 0,2 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  im Flussschlauch und  $k_{St} = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  im bei Hochwasser überströmten Vorlandbereich (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 138 ff.) 41
- Abbildung 3.13: Pond Creek near Louisville, Ky.: Sohle aus Schluff und Feinsand, Gefälle: 0,7 ‰ im Mittel:  $k_{St} = 14 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 198 ff.) 42

- Abbildung 3.14: Versuchsstrecke Suze - Sonceboz, Sohlbreite ca. 10 m; Foto: Fluss in Fließrichtung betrachtet; Abflussmenge 2,4 m<sup>3</sup>/s (entnommen aus [SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001], S. 37 ff.) 43
- Abbildung 3.15: Versuchsstrecke Gürbe - Belp, Sohlbreite ca. 12 m; Foto: Fluss gegen die Fließrichtung betrachtet; Abflussmenge 0,6 m<sup>3</sup>/s (entnommen aus [SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001], S. 43 ff.) 44
- Abbildung 3.16: Versuchsstrecke Emme - Burgdorf, Sohlbreite ca. 40 m; Foto: gegen die Fließrichtung schauend; Abflussmenge 2,1 m<sup>3</sup>/s, (entnommen aus [SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001], S. 49 ff.) 45
- Abbildung 3.17: Versuchsstrecke Glatt - Ausfluss des Greifensees, Sohlbreite ca. 9 m; Foto: in Fließrichtung schauend; Abflussmenge 1,7 m<sup>3</sup>/s (entnommen aus [SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001], S. 55 ff.) 46
- Abbildung 3.18: Rotach bei Friedrichshafen (Kurzbeschreibung, Foto, Querschnitt); **k<sub>St</sub>-Wert = 26 bis 34 m<sup>1/3</sup>/s** (nach [LfU 3, 2003], S. 29 f.) 47
- Abbildung 3.19: Neckar bei Horb (Kurzbeschreibung, Foto, Querschnitt und Interpretation des k<sub>St</sub>-Wertes); **k<sub>St</sub>-Wert** (bei HQ) = **32,5 m<sup>1/3</sup>/s** (nach [LfU 3, 2003], S. 40 ff.) 48
- Abbildung 3.20: Enz bei km 56+530 (Kurzbeschreibung, Foto und Kornverteilungskurve); **k<sub>St</sub>-Wert** (bei HQ) = **13 bis 52 m<sup>1/3</sup>/s** (nach [LfU 3, 2003], S. 79 ff.) 49
- Enz bei km 56+530 (Querschnitt, tabellarische Ergebnisse, Pegelschlüssel inkl. Verlauf der k<sub>St</sub>-Werte und Interpretation der k<sub>St</sub>-Werte); **k<sub>St</sub>-Wert = 13 bis 52 m<sup>1/3</sup>/s** (nach [LfU 3, 2003], S. 79 ff.) 50
- Abbildung 3.21: Ohrn in der Ortslage Öhringen (Kurzbeschreibung, Foto, Querschnitt und Interpretation des k<sub>St</sub>-Wertes); **k<sub>St</sub>-Wert = 18 m<sup>1/3</sup>/s** (nach [LfU 3, 2003], S. 38 f.) 51
- Abbildung 3.22: Böschung bzw. Vorland (Gras, Wiese): **k<sub>St</sub> = 30 m<sup>1/3</sup>/s** (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 34) 52
- Abbildung 3.23: Naturnahes Gewässer (Bach, Ufer unregelmäßig): **k<sub>St</sub> = 30 m<sup>1/3</sup>/s** (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 11) 52
- Abbildung 3.24: Natürliches Gewässer (Bach mit Wurzelgeflechten): **k<sub>St</sub> = 28 m<sup>1/3</sup>/s** (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 12) 53
- Abbildung 3.25: Böschung (krautiger Bewuchs): **k<sub>St</sub> = 22 m<sup>1/3</sup>/s** (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 38) 53
- Abbildung 3.26: Acheron River at Taggerty: k<sub>St</sub>-Werte in Abhängigkeit vom Durchfluss zwischen **21 m<sup>1/3</sup>/s** und **29 m<sup>1/3</sup>/s**; Foto bei einem Durchfluss von 5,16 m<sup>3</sup>/s (entnommen aus [LAND & WATER AUSTRALIA, 2009], S. 11 ff.) 54
- Abbildung 3.27: Mitta Mitta River at Hinnomunjie Bridge: k<sub>St</sub>-Werte in Abhängigkeit vom Durchfluss zwischen **20 m<sup>1/3</sup>/s** und **26 m<sup>1/3</sup>/s**; Foto bei einem Durchfluss von 1,68 m<sup>3</sup>/s (entnommen aus [LAND & WATER AUSTRALIA, 2009], S. 19 ff.) 55
- Abbildung 3.28: Stark verwachsener Querschnitt des Russbaches im Herbst 2004 - **k<sub>St</sub>-Wert = 18 bis 21 m<sup>1/3</sup>/s** (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 43) 57
- Abbildung 3.29: Querschnitt des Russbaches im Frühjahr 2005 – auf Stock geschnittener Böschungsbewuchs - **k<sub>St</sub>-Wert = 28 bis 33 m<sup>1/3</sup>/s** (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 45) 57
- Abbildung 3.30: Querschnitt des Russbaches inkl. sich einstellender Wasserspiegel bei unterschiedlichen Durchflüssen (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 46) 58

Abbildung 3.31: Durchgeführte Versuchsserien VS (entnommen aus [DELGYANSKA, 2012], S. 59 f.)	59
Abbildung 3.32: Gegenüberstellung der Beziehungen zwischen Wasserstand und Strickler-Beiwert der durchgeführte Versuchsserien VS (entnommen aus [DELGYANSKA, 2012], S. 73)	60
Abbildung 3.33: Gegenüberstellung der Wasserstands-Abflussbeziehungen der durchgeführte Versuchsserien VS (entnommen aus [DELGYANSKA, 2012], S. 72)	61
Abbildung 4.1: Untersuchte Pegelstellen (entnommen aus [EHYD, 2014], Ergänzungen vom Autor hinzugefügt)	63
Abbildung 4.2: Weiters untersuchte Pegelstellen (entnommen aus [EHYD, 2014], Ergänzungen vom Autor hinzugefügt)	64
Abbildung 4.3: Vermessung des Sohlgefälles am 23. 01. 2015 (Pegel Pinka in Oberwart)	64
Abbildung 4.4: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahmedatum: 06. 10. 2014	66
Abbildung 4.5: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 06. 10. 2014	66
Abbildung 4.6: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Gewässersohle (Gewässerbite = 6,5 m ca., Flussschotter und größere Wasserbausteine, die jedoch aufgrund der Lage einen geringen Fließwiderstand ergeben) – Annahme $k_S = 10$ cm	67
Abbildung 4.7: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Durchflusswerte (Monatsmaxima jeweils im Zeitraum von 1987-2010) in Abhängigkeit vom Wasserstand	68
Abbildung 4.8: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Durchflusswerte (Monatsmaxima jeweils im Zeitraum von 2007-2011) in Abhängigkeit vom Wasserstand	68
Abbildung 4.9: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Verlauf des $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss (beschriftete Werte: Durchfluss, Wasserstand und $k_{St}$ -Wert am Tag der Vermessung)	74
Abbildung 4.10: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Verlauf der $k_{St}$ -Werte (über den Abfluss)	74
Abbildung 4.11: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der $k_{St}$ - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q	75
Abbildung 4.12: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014	77
Abbildung 4.13: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014	77
Abbildung 4.14: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Gewässersohle, Breite des Fotos = 4 m ca. (v.a. Kies, vereinzelt größere Wasserbausteine) – Annahme $k_S = 8$ cm	78
Abbildung 4.15: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Durchflusswerte (Monatsmaxima im Zeitraum von 2010-2011 und zwei Extremereignisse: 21. 06. 1984: $Q = 60,1$ m <sup>3</sup> /s bei WSP = 330,6 cm und am 21.05.1999: $Q = 41,1$ m <sup>3</sup> /s bei WSP = 310,3 cm) in Abhängigkeit vom Wasserstand	79
Abbildung 4.16: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Verlauf des $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss (beschriftete Werte: Durchfluss, Wasserstand und $k_{St}$ -Wert am Tag der Vermessung)	83
Abbildung 4.17: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Verlauf der $k_{St}$ -Werte (über den Abfluss)	83

- Abbildung 4.18: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der  $k_{St}$  - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q 84
- Abbildung 4.19: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014 86
- Abbildung 4.20: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014 86
- Abbildung 4.21: Korngrößenverteilung (gewähltes Sohlmaterial: Kiessand) (entnommen aus [GEODZ, 2014], Zugriff am 14. 02. 2015) 87
- Abbildung 4.22: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Gewässersohle, Gewässerbreite = 3,9 m ca., sandiger Kies, vereinzelt größere Wasserbausteine –  $k_{S,Sohle} = 6$  cm 88
- Abbildung 4.23: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Durchflusswerte (Monatsmaxima jeweils im Zeitraum von 1995-2011) in Abhängigkeit vom Wasserstand 88
- Abbildung 4.24: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Verlauf des  $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss (beschriftete Werte: Durchfluss, Wasserstand und  $k_{St}$ -Wert am Tag der Vermessung) 93
- Abbildung 4.25: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Verlauf der  $k_{St}$ -Werte (über den Abfluss) 93
- Abbildung 4.26: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der  $k_{St}$  - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q 94
- Abbildung 4.27: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014 96
- Abbildung 4.28: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014 96
- Abbildung 4.29: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Gewässersohle (Kiessand und vereinzelt Wasserbausteine) –  $k_{S,Sohle}$  beträgt aufgrund von Sohlunebenheiten 8 cm 97
- Abbildung 4.30: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Durchflusswerte (Monatsmaxima jeweils im Zeitraum von 1988-2011 und von 2010-2011) in Abhängigkeit vom Wasserstand 98
- Abbildung 4.31: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Verlauf des  $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnullpunkt gemessen) über den Abfluss (beschriftete Werte: Durchfluss, Wasserstand und  $k_{St}$ -Wert am Tag der Vermessung) 102
- Abbildung 4.32: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Verlauf der  $k_{St}$ -Werte (über den Abfluss) 102
- Abbildung 4.33: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der  $k_{St}$  - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q 103
- Abbildung 4.34: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahmedatum: 05. 10. 2014 105
- Abbildung 4.35: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 05. 10. 2014 105

Abbildung 4.36: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Durchflusswerte (Monatsmaxima im Zeitraum von 2005-2011 und Monatsminima von 2009-2011) in Abhängigkeit vom Wasserstand (Raab in Neumarkt)	106
Abbildung 4.37: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Verlauf des $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnulppunkt gemessen) über den Abfluss	108
Abbildung 4.38: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der $k_{St}$ - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q	108
Abbildung 4.39: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Blick gegen die Fließrichtung; Aufnahmedatum: 05. 10. 2014	110
Abbildung 4.40: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 05. 10. 2014	110
Abbildung 4.41: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Durchflusswerte (Monatsmaxima im Zeitraum von 1987-2011 und die aufgezeichneten Ereignisse am 06. 10. 2014 und am 22. 10. 2014) in Abhängigkeit vom Wasserstand	111
Abbildung 4.42: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Verlauf des $k_{St}$ -Wertes und des Wasserspiegels (WSP-Höhe ab Pegelnulppunkt gemessen) über den Abfluss	113
Abbildung 4.43: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Schematische Darstellung des Querprofils, Blick in Fließrichtung; Darstellung der $k_{St}$ - Werte in Abhängigkeit der mittleren Wassertiefe WT und des Durchflusses Q	113
Abbildung 5.1: Tauchenbach in Altschlaining, Blick in Fließrichtung; Aufnahmedatum: 12. 11. 2014	114
Abbildung 5.2: Natürliches Gewässer (Bach mit Wurzelgeflechten): $k_{St} = 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (entnommen aus [KNAUF, 2003], S. 12)	115
Abbildung 5.3: Murder Creek near Monticello, Ga.: Sohle aus Sand und Kies, Gefälle: 3 ‰ im Mittel: $k_{St} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 130 ff.)	115
Abbildung 5.4: Tobesofkee Creek near Macon, Ga.: Sohle aus Sand und Kies und einigen größeren Steinen, Gefälle: 0,7 ‰ im Mittel: $k_{St} = 23 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ am 07. 05. 58, $k_{St} = 24 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ am 06. 02. 59 und $k_{St} = 26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ am 09. 02. 59 (entnommen aus [BARNES, 1967], S. 94 ff.)	116
Abbildung 5.5: Stark verwachsener Querschnitt des Russbaches im Herbst 2004 - $k_{St}$ -Wert = 18 bis 21 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 43)	117
Abbildung 5.6: Querschnitt des Russbaches im Frühjahr 2005 – auf Stock geschnittener Böschungsbewuchs - $k_{St}$ -Wert = 28 bis 33 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 45)	117

## 7.6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: 8-stufige Skala nach ELLENBERG für die Bewertung des Vegetationszustandes eines Lebensraumes (entnommen aus [PAUGAM, 2008], S. 20, geringfügig verändert)	4
Tabelle 2.2: Typische äquivalente Sandrauheiten $k_S$ [mm] (entnommen aus [LfU 3, 2003], S. 17 f., verändert)	11
Tabelle 2.3: Zusammenstellung ermittelter Formbeiwerte verschiedener Autoren (entnommen aus [HABERSACK, 2007], S. 7)	12
Tabelle 2.4: Zusammenstellung von $k_{St}$ -Werten für offene Gerinne und Vorlandbereiche (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 21 bzw. [LfU 3, 2003], S. 12, verändert)	16
Tabelle 2.5: Faktoren zur Bestimmung des Manning-Beiwertes $n$ nach [COWAN, 1956] (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 46)	24
Tabelle 3.1: Typische äquivalente Sandrauheiten $k_S$ [mm] von offenen Gerinnen (nach [DVWK, 1991], entnommen aus [JIRKA, 2009], S. 22, verändert)	30
Tabelle 3.2: Typische äquivalente Sandrauheiten $k_S$ [mm] (entnommen aus [LfU 3, 2003], S. 17 f., verändert)	31
Tabelle 3.3: Unterschiedliche Ansätze für die Beziehung zwischen äquivalenter Sandrauheit und charakteristischem Korndurchmesser (entnommen aus [LfU 2, 2002], S. 21)	32
Tabelle 3.4: Zusammenstellung von $k_{St}$ -Werten für offene Gerinne und Vorlandbereiche (entnommen aus [LfU 1, 2002], S. 21 bzw. [LfU 3, 2003], S. 12, verändert)	32
Tabelle 4.1: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])	65
Tabelle 4.2: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Strickler-Beiwerte	71
Tabelle 4.3: Pinka, Pegelstelle Pinkafeld: Strickler-Beiwerte – <b>Gesamt</b> , für die <b>Sohle</b> und für die <b>Böschung, rot dargestellte Werte in der Spalte</b> : Zahlenwerte ohne Korrektur des Pegelschlüssels (die grün schraffierten Zellen werden bei der Iteration verändert, bis die Summe der Teilflächen gleich der Gesamtfläche entspricht; siehe Abbildung 2.13)	73
Tabelle 4.4: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])	76
Tabelle 4.5: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Strickler-Beiwerte	80
Tabelle 4.6: Pinka, Pegelstelle Oberwart: Strickler-Beiwerte <b>Gesamt</b> , für die <b>Sohle</b> und für die <b>Böschung, rot dargestellte Werte in der Spalte</b> : Zahlenwerte bei einem Sohlgefälle von 6 ‰ (die grün schraffierten Zellen werden bei der Iteration verändert, bis die Summe der Teilflächen gleich der Gesamtfläche entspricht; siehe Abbildung 2.13)	82
Tabelle 4.7: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])	85
Tabelle 4.8: Ansätze für die Beziehung zwischen äquivalenter Sandrauheit und charakteristischem Korndurchmesser (entnommen aus [LfU 2, 2002], S. 21)	87
Tabelle 4.9: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Strickler-Beiwerte	90
Tabelle 4.10: Zickenbach, Pegelstelle Siget i. d. Wart: Strickler-Beiwerte <b>Gesamt</b> , für die <b>Sohle</b> und für die <b>Böschung, rot dargestellte Werte in der Spalte</b> : Zahlenwerte ohne	

Korrektur des Pegelschlüssels (die grün schraffierten Zellen werden bei der Iteration verändert, bis die Summe der Teilflächen gleich der Gesamtfläche entspricht; siehe Abbildung 2.13)	92
Tabelle 4.11: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])	95
Tabelle 4.12: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Strickler-Beiwerte	99
Tabelle 4.13: Tauchenbach, Pegelstelle Altschlaining: Strickler-Beiwerte <b>Gesamt</b> , für die <b>Sohle</b> und für die <b>Böschung</b> , <b>rot dargestellte Werte in der Spalte</b> : Zahlenwerte ohne Korrektur des Pegelschlüssels (die grün schraffierten Zellen werden bei der Iteration verändert, bis die Summe der Teilflächen gleich der Gesamtfläche entspricht; siehe Abbildung 2.13)	101
Tabelle 4.14: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])	104
Tabelle 4.15: Raab, Pegelstelle Neumarkt: Strickler-Beiwerte	107
Tabelle 4.16: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Jährlichkeitsstatistik (entnommen aus [WASSERPORTAL BGLD. 2014])	109
Tabelle 4.17: Lafnitz, Pegelstelle Eltendorf: Strickler-Beiwerte	112

## 8 Literatur

[AIGNER, 1994] Aigner, D.: Hydraulische Berechnung von offenen Gerinnen. Wasserwirtschaft Wassertechnik, Heft 6, 1994.

[ATV-DVWK-A 110, 2001] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen. Ausgabedatum: 2001-09-00

[BARNES, 1967] Barnes, Harry H., Jr.: Roughness Characteristics of Natural Channels. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849. Washington: United States Government Printing Office, 1967.

[BOCK, 1966] Bock, J.: Einfluss der Querschnittsform auf die Widerstandsbeiwerte offener Gerinne. Technischer Bericht des Inst. für Hydromechanik und Wasserbau, Nr. 2, TH Darmstadt, 1966.

[BOLLRICH, 1996] Bollrich, Gerhard; Martin, Helmut; Preißler, Günter; Elze, Rainer; Pohl, Reinhard: Technische Hydromechanik 1. 4. Auflage; Dresden: Verlag für Bauwesen GmbH, 1996.

[BOLLRICH, 2013] Bollrich, Gerhard; Martin, Helmut; Preißler, Günter; Elze, Rainer; Pohl, Reinhard: Technische Hydromechanik. 1. Grundlagen. 7., überarb. Aufl. Berlin; Wien [u.a.]: Beuth Berlin: Verl. Bauwesen; Berlin: Huss-Medien 2013

[BORNSCHEIN, 2006] Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 33: Die Ausbreitung von Schwallwellen auf trockener Sohle unter besonderer Berücksichtigung der Wellenfront. Dresden: Selbstverlag der TU Dresden, 2006.

[CAYUELA, 2005] Cayuela-Lopez, Manuel: Empfindlichkeit von Kalkulationsmethoden in naturnahen Gewässerquerschnitten. Diplomarbeit Polytechnische Universität Valencia (Spanien), 2005.

[COWAN, 1956] COWAN, W.L.: Estimating hydraulic roughness coefficients. In: Agricultural Engineering, Vol 37, No. 7. 1956.

[DELGYANSKA, 2012] Delgyanska, Gergana: Auswirkungen des Rückschnitts von Böschungsbewuchs auf die hydraulische Leistungsfähigkeit eines naturnahen Gerinnequerschnitts. Diplomarbeit Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie. Wien, 2012.

[DIN EN 752-4, 1997] DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW)\*Water Practice Standards Committee: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Teil 4:

Hydraulische Berechnung und Umweltschutzaspekte; Deutsche Fassung EN 752-4:1997.

[DITTRICH, 1998] Dittrich, Andreas: Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH); Dissertation; Karlsruhe, 1999.

[DVWK, 1990] Hrsg.: Dt. Verb. für Wasserwirtschaft u. Kulturbau e. V. (DVWK): Hydraulische Methoden zum Erfassen von Rauheiten. Zsgest. von Ralph C. M. SCHRÖDER. – Hamburg, Berlin, Parey. 1990.

[DVWK, 1991] DVWK (Hrsg.): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Merkblätter, Heft 220/1991. Hamburg und Berlin, 1991.

[EHYD, 2014] <http://ehyd.gv.at/#>, Zugriffe vom Okt. 2014 – Februar 2015

[EINSTEIN, 1934] Einstein, H.A.: Der hydraulische oder Profil-Radius. Schweizerische Bauzeitung 103, Heft 8, 1934.

[ENGELUND, 1966] Engelund, F.; Hansen, E.: Investigation of flow in alluvial streams. Acta Polytechnica, Scandinavia, Kopenhagen, 1966.

[EVERS, 1983] Evers, P.: Strömungsvorgänge in gegliederten Gerinnen mit extremen Rauheitsunterschieden. Mitt. Inst. für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Heft 45, 1983.

[FÄH, 1995] Fäh, Roland u.a.: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband: ÖWAV-Seminar, 21. November 1995: Mathematische Modelle offener Gerinne. Wien: Inst. für Konstruktiven Wasserbau d. Techn. Univ. Wien, 1995

[FASKEN, 1963] Fasken, G.B., 1963, Guide for selecting roughness coefficient "n" values for channels: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Lincoln, Nebr., 24 p. plus appendixes.

[FREIMANN, 2014] Freimann, Robert: Hydraulik für Bauingenieure - Grundlagen und Anwendungen. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Leipzig: Fachbuchverlag im Carl Hanser Verlag München, 2014.

[GARBRECHT, 1961] Garbrecht, G.: Abflussberechnung für Flüsse und Kanäle. Die Wasserwirtschaft 51, S. 40-45 und S. 72-77, 1961.

[GEODZ, 2014] <http://www.geodz.com/deu/d/Durchflusshysterese>, Zugriff am 28. 11. 2014

[HABERSACK, 2007] Habersack, Helmut: Vorlesungsunterlagen zu „Computergestützte Gewässermodellierungen. Vorlesung am 21. 11. 2007. Wien: Universität für Bodenkultur; Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau (IHWH).

[https://iwhw.boku.ac.at/habersack/816332/Files/Flie%C3%9Fwiderstand\\_Einheit\\_5.pdf](https://iwhw.boku.ac.at/habersack/816332/Files/Flie%C3%9Fwiderstand_Einheit_5.pdf).  
Zugriff am 17. 11. 2014.

[HEINEMANN/PAUL, 1998] Heinemann, Ekkehard; Paul, Runo: Hydraulik für Bauingenieure: mit 20 Tabellen. Stuttgart, Leipzig: Teubner, 1998.

[HELMIG, 2005] Helmig, Rainer: Grundlagen der Hydromechanik. Aachen: Shaker Verlag, 2005.

[HEY, 1979] Hey, R. D.: Flow resistance in gravel-bed rivers. Journ. of Hydr. Div., ASCE, HY 4, Vol. 105, pp. 365-380, 1979.

[HORTON, 1933] Horton, R.: Separate roughness coefficients for channel bottom and sides. Engineering News-Record, Vol. 111, No. 2, 1933.

[LfU 1, 2002] Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Hydraulik naturnaher Fließgewässer: Teil 1- Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren. 1. Auflage; Karlsruhe, 2002.

[LfU 2, 2002] Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Hydraulik naturnaher Fließgewässer: Teil 2- Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen. 1. Auflage; Karlsruhe, 2002.

[LfU 3, 2002] Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Hydraulik naturnaher Fließgewässer: Teil 3- Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg. 1. Auflage; Karlsruhe, 2002.

[INDLEKOFER, 2003] INDLEKOFER, Horst: Abflussberechnung für naturnahe Fließgewässer nach dem Mertens-Strickler-Verfahren. Wasser & Boden, 55/7+8. Berlin: Blackwell-Verlag, 2003.

[JIRKA, 2009] Jirka, Gerhard H., Lang, Cornelia: Einführung in die Gerinnehydraulik. Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.

[KAMPHIUS, 1974] Kamphius, J. W.: Determination of sand roughness for fixed beds. Journ. of Hydr. Res., 12, Nr. 2, S. 193-204, 1974.

[KNAUF, 2003] basierend auf: Knauf, D.: Rauheitsbeiwerte - Zusammenhang zwischen Rauheitsbeiwerten nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER und den äquivalenten Rauheitsbeiwerten nach Prandtl-Colebrook im hydraulisch rauen Bereich. Was-

ser u. Abfall 4-5, 2003. <http://www.psw-knauf.de/download/Gewaesser-Rauheiten.pdf>, Zugriff am 24. 11. 2014

[LAND & WATER AUSTRALIA, 2009] Land & Water Australia, Australian Government: An Australian Handbook of Stream Roughness Coefficients. Canberra: 2009.

[LANGE, 1993] Lange, Gerd [Hrsg.]; Grubinger, Herbert: Gewässerregulierung, Gewässerpflege. 3. Auflage. Hamburg: Verlag Parey, 1993.

[LATTERMANN, 2010] Lattermann, Eberhard: Wasserbau-Praxis – Mit Berechnungsbeispielen.3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Bauwerk Verlag, 2010.

[LEHMANN, 2005] Lehmann, Boris; Bernhardt, Hans-Helmut; Nestmann, Franz: Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Empfehlung zur naturnahen Entwicklung ausgebauter Fließgewässer in Ortslagen unter besonderer Berücksichtigung des Hochwasserschutzes. Universität Karlsruhe, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung. Februar 2005.

[MERTENS, 1996] Mertens, W.: Maßnahmen zur naturnahen Gewässerstabilisierung: Grundlagen hydraulisch-sedimentologischer Berechnungen. Hamburg, Berlin: DVWK-Schriften 118, Paul Parey Verlag, 1996.,

[NAUDASCHER, 1992] Naudascher, Eduard: Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke. 2. Auflage; Wien u.a.: Springer-Verlag, 1992.

[OUMERACI, 2014] Oumeraci, Hocine: Hydromechanik. Vorlesungsumdruck für die Bachelorvorlesung „Hydromechanik“. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Ausgabe April 2014.

[PAUGAM, 2008] Paugam, Maëlle: Empfindlichkeit der hydraulischen Berechnung naturnaher Gerinnequerschnitte dargestellt anhand von Durchflussmessungen am Russbach (Marchfeld-System). Diplomarbeit Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie. Wien, 2008.

[PHILLIPS, 1998] Jeff V. Phillips and Todd L. Ingersoll: Verification of Roughness Coefficients for Selected Natural and Constructed Stream Channels in Arizona (U.S. Geological Survey Professional Paper 1584). Prepared in cooperation with the Flood Control District of Maricopa County. Denver, 1998.

[PHILLIPS, 2006] Phillips, J.V., and Tadayon, S., 2006, Selection of Manning's roughness coefficient for natural and constructed vegetated and non-vegetated chan-

nels, and vegetation maintenance plan guidelines for vegetated channels in central Arizona: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5108, 41 p.

[RÖSSERT, 1994] Rössert, Robert: Hydraulik im Wasserbau: mit 25 Tabellen. 9., verb. Auflage. München: Oldenbourg Verlag GmbH, 1994.

[SCHNEIDER, 1994] SCHNEIDER, Klaus-Jürgen [Hrsg.]; BERTIG, Rudolf: Bautabellen für Ingenieure: mit europäischen und nationalen Vorschriften. Düsseldorf: Werner, 1994.

[SCHRÖDER, R. C. 1994] SCHRÖDER, Ralph C.M.: Technische Hydraulik. Berlin [u.a.]: Springer-Verlag, 1994.

[SCHRÖDER, W., 1972] SCHRÖDER, Wolfgang: Abflusswiderstände in alluvialen Bächen mit Sandbetten. Die Wasserwirtschaft 62, 1972.

[SCHRÖDER, W., 1994] SCHRÖDER, Wolfgang: Grundlagen des Wasserbaus: Hydrologie, Hydraulik, Wasserrecht. 3. Auflage. Düsseldorf: Werner-Verlag, 1994.

[SCHRÖDER, W., 1999] SCHRÖDER, Wolfgang: Grundlagen des Wasserbaus: Hydrologie, Hydraulik, Wasserrecht. 4. Auflage. Düsseldorf: Werner-Verlag, 1999.

[SCHRÖDER, R. C., 1966] SCHRÖDER, Ralph C. M.; Press, Heinrich: Hydromechanik im Wasserbau. Berlin, 1966.

[SÖHNGEN, 1987] Söhngen, B.: Das Formbeiwertkonzept zur Berechnung des Fließwiderstandes in Rohren und Gerinnen. Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Nr. 39, Inst. für Wasserbau, TH Darmstadt, 1987.

[SOONG, 2012] Soong, David T., Prater, Crystal D., Halfar, Teresa M., and Wobig, Loren A., 2012, Manning's roughness coefficient for Illinois streams: U.S. Geological Survey Data Series 668, 14 p.

[SPREAFICO/ HODEL/ KASPAR, 2001] Spreafico, M.; Hodel, H.P.; Kaspar, H.: Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern. Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque Nr. 1. Bern: 2001.

[UNSER, 2005] Unser, Klaus: Skript Hydromechanik Fachhochschule Mainz. Aachen: Shaker Verlag, 2005.

[VEN TE CHOW, 1959] Chow, Ven Te: Open-channel hydraulics. New York, NY [u.a.]: McGraw-Hill, 1959.

[WASSERPORTAL BGLD. 2014]

<http://wasser.bglld.gv.at/hydrographie/abfluss/moschendorf.html>, Zugriffe von Okt. 2014 bis Februar 2015

[ZUPPKE, 1992] Zuppke, Bernd: Hydromechanik im Bauwesen: Rechenverfahren, Formeln und Diagramme; Fallbeispiele, BASIC-Programme. 4., überarb. Aufl. Wiesbaden [u.a.] : Bau-Verlag, 1992.