



DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Empfindlichkeit der hydraulischen Berechnung naturnaher Gerinnequerschnitte

dargestellt anhand von Durchflussmessungen am Russbach
(Machfeldkanal-System)

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs unter der Leitung von

**Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Peter TSCHERNUTTER
und Dipl.-Ing. Hubert HONSOWITZ**

E 222

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

**eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen**

von

Maëlle PAUGAM

Matr.-Nr. : E467 – 0626884

maelle.paugam@centraliens-nantes.net

45 Bd Dubreuil – Villa 22 – 91400 ORSAY – FRANKREICH

Wien, im Oktober 2008

Vorwort - Danksagung

Diese Diplomarbeit behandelt die Bestimmung von Flussbeiwerten (bzw. Stickler-Beiwerten) naturnaher Fließgewässer anhand von Wasserstand- und Durchflussmessungen, die am Russbach im Machfeldkanal (NÖ) durchgeführt wurden. Verschiedene Berechnungsmethoden dieser Beiwerte wurden anhand von einer Empfindlichkeitsanalyse untersucht. Diese Diplomarbeit trägt dazu bei, die Wirkung der Pflegemaßnahmen am Bewuchs auf die Leistungsfähigkeit des Russbaches zu bestimmen.

Diese Arbeit wurde von Herrn Dipl.-Ing. Hubert Honsowitz ermöglicht. Er hat mir dieses interessante Thema vorgeschlagen und ich möchte ihm an dieser Stelle für seine Betreuung während der ganzen Diplomarbeit herzlich danken. Ich danke auch Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Tschernutter für seine Betreuung und seiner ganzen Mannschaft am Institut für ihren Empfang und die Bereitstellung eines bequemen Arbeitsraumes.

Ich möchte mich auch bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Blöschl, Leiter der Abteilung Ingenieurhydrologie an der TU Wien, für seine Verfügbarkeit und sein hilfreiches Urteil bedanken.

Meine Dankbarkeit gilt ebenso Herrn Dipl.-Ing Harald Weyermayer und Herrn Dipl.-Ing Manuel Cayuela-Lopez der Fachfeldkanal-Betriebsgesellschaft. Sie haben mir die umfangreichen Messdaten zur Verfügung gestellt und mir ihre Zeit für wichtige und sehr dienliche Besprechungen gewidmet. Ich bedanke mich auch bei Frau Ing. Susanne Karl, die mir geholfen hat, die Pläne des Machfeldkanal-Systems in den Archiven der Machfeldkanalgesellschaft zu finden.

Ein letzter Dank gilt Marielle für den EDV-Beistand und Myriam und Gina für die erneute Lektüre.

Abstract

Soil bioengineering, which uses live plant materials to provide erosion control, is a cost effective and durable solution to river bank protection. Furthermore it achieves a good ecological functionality. For appropriate boundary conditions, this method is currently more and more adopted in the design of nature-like rivers.

In the framework of flood protection, the evaluation of the vegetation effect on the hydraulic behaviour of rivers is still a research subject. In the last 30 years, different calculation procedures to describe flow resistance by vegetation have been developed. In the German-speaking world it has been especially researched by Mertens (1989), Specht (2002) and Indlekofer (2003 and 2005). These calculation procedures are based on the main idea of a fictitious rough wall between bank vegetation and main stream, which modelizes the flow resistance due to vegetation. The hydraulic formulas of Darcy-Weisbach, Gauckler-Manning-Strickler and Einstein-Horton are then used to calculate the resulting discharge in the river.

The goal of this master's thesis is to study different flow calculation procedures to find a plausible model of the flow resistance in the nature-like designed river Russbach (part of the Machfeldkanal irrigation system in Lower Austria). This modelisation aims at assessing the influence of growth and tending of vegetation on the hydraulic capacity of the river in order to find the minimal vegetation tending measures to adopt.

The discharge in the Machfeldkanal-net is controllable so that numerous discharge and water level measurements, under different conditions and in different seasons, have been carried out in the river Russbach. This data are the basis of this master's thesis. The study has been restricted to just one typical cross-section of the river Russbach.

The first step of the work consists in assessing a Strickler flow coefficient k_{St} (and friction factor λ respectively) for the entire cross-section with through-flowed vegetation. This coefficient is back calculated by means of the Gauckler-Manning-Strickler formula and the appropriate discharge and water level measurements. This value is the target for the calculation based on the model of the flow resistance due to each roughness element (bottom, vegetation).

The second step deals with the estimation of the equivalent sand-grain roughness k_s of the bottom. The roughness k_s is first back calculated by means of the Darcy-Weisbach formula for discharge and water level measurement without flowed vegetation. This first value is then compared to the values of the grain size distribution curve of the building material.

The third step is the estimation of the vegetation flow resistance (roughness of the fictitious wall) by means of the calculation procedures according to Mertens and Specht.

The last step consists in superposing each roughness to obtain a friction factor available for the complete cross-section. This superposition is executed by means of different methods (Indlekofer (2003 and 2005) and DVWK (1991)) based on the assumption of Einstein-Horton. The calculated value has to accord with the value of the first step. The main tool to determine the best calculation procedure and also the most plausible value for the friction factor of the cross-section is the sensitivity analysis. Each input parameter is estimated with a confidence interval and its effect on the calculated value's stability is determined.

This study has shown that, in the case of the river Russbach, the vegetation contributes to the flow resistance mostly through low overhanging branches. The density of the vegetation on the bank has just a marginal effect. But until now there isn't any modelisation to quantify the effect of these hanging branches. Further Studies have to be done to find a modelisation of this important flow resistance.

When there are no low overhanging branches, the equivalent sand-grain roughness of the bottom has the most important influence on the friction factor of the entire cross-section compared to the fictitious roughness due to vegetation. It is furthermore a sensible input parameter. The equivalent sand-grain roughness of the bottom has therefore to be high precisely determined. In this case, the model of Specht (2002) for the fictitious roughness due to vegetation used with the superposition according to Indlekofer (2003) appears as a good calculation procedure.

To confirm and improve the first results of this Master's thesis on the effect of the vegetation on the discharge in a nature-like river, other cross-sections of the river Russbach should be analyzed in the same way. Other rivers, where the vegetation has more influence, should be investigated as well.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung – Aufgabenstellung	10
2.	Böschungsbewuchs – Zweck, Wirkung Pflege u. Zustandhaltung	11
3.	Hydraulische Leistungsfähigkeit.....	12
3.1.	Fließformeln und –widerstände bei Querschnitten mit einheitlicher Rauheit	13
3.1.1.	Notwendige Eigenschaften des Abflusses für die Anwendung der Fließformeln	13
3.1.2.	Fließformeln zur Verfügung	13
3.1.2.1.	Allgemeine Form von De Chézy	13
3.1.2.2.	Universelles Fließgesetz von Darcy-Weisbach (DW-Gleichung).....	14
3.1.2.2.1.	Ansätze für die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes λ	14
3.1.2.2.2.	Bestimmung der äquivalenten Sandrauheit k_s	16
3.1.2.3.	Fließformel von Gauckler, Manning und Strickler (GMS-Gleichung).....	18
3.1.3.	Beziehungen zwischen dem Strickler-Beiwert k_{St} und der äquivalenten Sandrauheit k_s	18
3.2.	Anwendung der Fließformeln in naturnahen Querschnitten.....	20
3.2.1.	Überlagerungsverfahren der Fließwiderstände bei kompakten nicht gegliederten Querschnitten.....	23
3.2.2.	Fließverluste in naturnahen gegliederten Querschnitten – Charakterisierung durch hydraulische Kenngrößen.....	24
3.2.2.1.	Konzept der Trennflächen bei (durch Geometrie oder Bewuchs) gegliederten Querschnitten.....	24
3.2.2.2.	Zusammenstellung der verschiedenen Fließverlust-Typen.....	27
3.2.3.	Vorhandene Berechnungsansätze für die Durchflussermittlung eines bewuchsfreien Teilquerschnitts bei naturnahen Gerinnen	28
3.2.3.1.	Ermittlung des fiktiven Trennflächenwiderstandes λ_T	28
3.2.3.1.1.	Geschichtliche Entwicklung der Forschung - Hauptpunkte.....	28
3.2.3.1.2.	Anwendung des Mertens-Verfahrens und deren Ergänzung.....	32
3.2.3.1.2.1.	Berechnungsmethode des Mertens-Verfahrens.....	32
3.2.3.1.2.2.	Ergänzung des Mertens-Verfahrens nach SPECHT (2002)	36
3.2.3.2.	Überlagerungsmethoden	37
3.2.3.2.1.	Überlagerungsmethode laut Empfehlungen von DWVK (1991).....	37
3.2.3.2.2.	Erste Überlagerungsmethode nach INDLEKOFER (2003)	37
3.2.3.2.3.	Zweite Überlagerungsmethode nach INDLEKOFER (2005)	38
4.	Auswertung der Messergebnisse am Russbach – Machfeldkanal	42
4.1.	Das Machfeldkanal-System	42

4.2.	Datengrundlage – Messungen	43
4.3.	Hydraulische und terrestrische Charakterisierung des Profils Q1	45
4.4.	Auswertung im Profil Q1.....	49
4.4.1.	Abschätzung des Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}^*$ (initialer Wert + Vertrauensbereich) durch Rückrechnung mit der Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung.....	51
4.4.1.1.	Eingangsparameter zur Bestimmung von $k_{St,ges}^*$	51
4.4.1.2.	Rückrechnung aus den Messungen des Herbstes 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$	52
4.4.1.2.1.	Bestimmung der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*(H4-10)$	52
4.4.1.2.1.1.	Initiale Werte der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*(H4-10)$	52
4.4.1.2.1.2.	Vertrauensbereich der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*(H4-10)$	54
4.4.1.2.1.3.	Zusammenfassung - Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*(H4-10)$:	56
4.4.1.2.2.	Rückrechnung des gesamten Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}^*(H4-10)$	57
4.4.1.2.2.1.	Initialer Wert von $k_{St,ges}^*(H4-10)$	57
4.4.1.2.2.2.	Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*(H4-10)$ (durch Variierung der Parameter).....	57
4.4.1.3.	Rückrechnung aus den Messungen im Frühjahr 2005 (nach Pflegemaßnahmen)	62
4.4.1.3.1.	Bestimmung der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*(F5-10)$	62
4.4.1.3.2.	Rückrechnung von $k_{St,ges}^*(F5-10)$	62
4.4.1.3.2.1.	initialer Wert von $k_{St,ges}^*(F5-10)$	62
4.4.1.3.2.2.	Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*(F5-10)$ (durch Variierung der Parameter)	62
4.4.1.4.	Schlussfolgerung nach Vergleich zwischen $k_{St,ges}^*(H4-10)$ und $k_{St,ges}^*(F5-10)$..	63
4.4.2.	Ermittlung der Eingangsparameter für die Berechnung des Manning-Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}$	64
4.4.2.1.	Bestimmung der äquivalenten Sandrauheit der Sohle $k_{s_{so}}$ im Profil	64
4.4.2.1.1.	Aussage über die äquivalente Sandrauheit der Sohle $k_{s_{so}}$ aus der Untersuchung des Einbaumaterials im Russbach	65
4.4.2.1.2.	Rückrechnung der äquivalenten Sandrauheit der Sohle $k_{s_{so}}$ mit der Darcy-Weißbach Gleichung und den gemessenen Durchflüssen.....	65
4.4.2.1.2.1.	Eingangsparameter und Annahmen zur Bestimmung von $k_{s_{so}}$	65
4.4.2.1.2.2.	Erster Berechnungsvorgang für die Rückrechnung von $k_{s_{so}}$	71
4.4.2.1.2.3.	Zweiter Berechnungsvorgang für die Rückrechnung von $k_{s_{so}}$	75
4.4.2.1.2.4.	Dritter Berechnungsvorgang für die Rückrechnung von $k_{s_{so}}$	81
4.4.2.1.2.5.	Vierter Berechnungsvorgang für die Rückrechnung von $k_{s_{so}}$	84
4.4.2.1.2.6.	Schlussfolgerungen : Bestimmung von $k_{s_{so}}$	87
4.4.2.2.	Bestimmung der Bewuchsparameter.....	90
4.4.2.2.1.	Bestimmung anhand von Messungen vor Ort	90
4.4.2.2.2.	Empfehlungen aus der Literatur	91
4.4.2.2.3.	Bestimmung des Vertrauensbereiches für die Bewuchsparameter	91
4.4.3.	Berechnung der gesamten Strickler-Beiwerte und der berechneten Durchflüsse im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$	92
4.4.3.1.	Berechnung der initialen Werte mit verschiedenen Methoden.....	92
4.4.3.1.1.	Berechnung der initialen Werte des gesamten Strickler-Beiwertes $k_{St,ges,init}(H4-10)$ und des Durchflusses $Q_{ber,init}(H4-10)$ im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$	92
4.4.3.1.1.2.	Berechnungen mit den verschiedenen Verfahren.....	93

4.4.3.1.1.3.	Schlussfolgerungen : Vergleich mit den zu erreichenden Werten für den Herbst 2004	93
4.4.3.1.2.	Berechnung der initialen Werte des gesamten Strickler-Beiwertes $k_{St,ges,init}(F05-10)$ und des Durchflusses $Q_{ber,init}(F5-10)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$..	94
4.4.3.1.2.2.	Berechnungen mit den verschiedenen Verfahren.....	94
4.4.3.1.2.3.	Schlussfolgerungen : Vergleich mit den zu erreichenden Werten für das Frühjahr 2005	95
4.4.3.2	Ermittlung der Fehlerschranken des berechneten Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}(F5-10)$ und des berechneten Durchflusses $Q_{ber}(F5-10)$ für die verschiedenen Methoden.....	95
4.4.3.2.1.	Vertrauensbereich der Eingangsparameter.....	95
4.4.3.2.2.	Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Berechnungsmethoden des gesamten Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}$ und des Durchflusses Q_{ber}	96
4.4.3.2.2.1.	Analyse der Methode : Trennflächenrauheiten laut Mertens-Verfahren und Überlagerung nach DVWK-91	97
4.4.3.2.2.2.	Analyse der Methode : Trennflächenrauheiten laut Mertens-Verfahren und Überlagerung nach INDLEKOFER (2003).....	102
4.4.3.2.2.3.	Analyse der Methode : Trennflächenrauheiten laut Mertens-Verfahren und Überlagerung nach INDLEKOFER (2005).....	103
4.4.3.2.2.4.	Analyse der Methode : Trennflächenrauheiten laut Specht-Verfahren und Überlagerung nach INDLEKOFER (2003).....	105
4.4.3.2.3.	Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse mit den zu erreichenden Werten	110
5.	Résumé	111
6.	Literatur	114
7.	Anhang	116

Symbolverzeichnis :

A	numerischer Koeffizient bei der Bestimmung des Strickler-Beiwertes	$[m^{1/2}/s]$
a_1	numerischer Koeffizient bei der Ermittlung des Beiwertes c_{geo} (Specht-Verfahren)	$[-]$
a_2	numerischer Koeffizient bei der Ermittlung des Beiwertes c_{geo} (Specht-Verfahren)	$[-]$
a_x	Abstand zwischen den Bewuchsstämmen in der Fließrichtung (Bewuchsparameter)	$[m]$
a_y	Abstand zwischen den Bewuchsstämmen quer zur Fließrichtung (Bewuchsparameter)	$[m]$
b	Breite des Gerinnes (bzw. eines Teilbereiches des Querschnitts)	$[m]$
B	Bewuchsparameter	$[-]$
C	Chézy-Beiwert	$[m^{1/2}/s]$
c	Bewuchsdichtebeiwert	$[-]$
c_{geo}	Geometriebeiwert nach Specht	$[-]$
D	Rohrdurchmesser	$[m]$
D_{eff}	wirksamer hydraulischer Durchmesser	$[m]$
d_i	mittlerer Korndurchmesser der Fraktion i ($\in N$)	$[m]$
d_m	Maßgebender Durchmesser einer Kornmischung (nach Meyer-Peter und Müller, 1949)	$[m]$
d_p	Durchmesser der Bewuchsstämme	$[m]$
F	Querschnittsfläche (bzw. -teilfläche)	$[m^2]$
f	Formbeiwert	$[-]$
f_{eB}	Übertragungsfunktion von symmetrischem auf einseitigen Bewuchs (bei dem Specht-Verfahren)	$[-]$
f_T	Transformationsfunktion zur Übertragung auf beliebige Bewuchsanordnung (bei dem Specht-Verfahren)	$[-]$
g	Erdschwerebeschleunigung	$[m/s^2]$
I_E	Energieliniengefälle	$[\%o]$
I_{so}	Gefälle der Sohle	$[\%o]$
J	Wasserspiegelgefälle	$[\%o]$
k	Sandrauheit (eines Rohres)	$[m]$

k_{geo}	geometrisches Rauheitsmaß der Sohle	[m]
k_s	äquivalente Sandrauheit der Sohle	[m]
k_{St}	Strickler-Beiwert	[m ^{1/3} /s]
k_T	Fiktive Rauheit einer Trennfläche (= Trennflächenrauheit)	[m]
p_i	prozentualer Anteil einer Kornfraktion i ($\in N$)	[%]
Q	Durchfluss	[m ³ /s]
q	spezifischer Durchfluss	[m ³ /s/m]
$Q1$	untersuchtes Querprofil am Russbach	[-]
Re	Reynolds-Zahl	[-]
R_{hy}	hydraulischer Radius	[m]
St	Station eines Profils am Bach	[km]
T_f	Trennflächenfußpunkt	[m Entfernung von linker Böschung]
t_w	Fließtiefe	[m]
u	benetzter Umfang	[m]
v	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
W	gemessener Wasserstand	[m]
W_{sp}	Wasserspiegelhöhe	[m]
$ \Delta X $	absolute Fehlergröße für die Größe X . Der Vertrauensbereich von X ist daher $[X_{\text{init}} - \Delta X ; X_{\text{init}} + \Delta X]$ [HOENTZSCH, 2006]	[Einheit von X]
$ \Delta X/X_{\text{init}} $	relative Fehlergröße für die Größe X . $X = X_{\text{init}} \pm \Delta X/X_{\text{init}} $ [HOENTZSCH, 2006]	[%]
α	numerischer Koeffizient	[m ^{-8/3}]
β	numerischer Koeffizient	[m ^{1/3} /s]
δ	numerischer Koeffizient	[m ³ /s]
γ	numerischer Koeffizient	[m]
κ	Korrekturbeiwert	[-]

λ	Widerstandsbeiwert	[-]
ν	numerischer Koeffizient	[-]
ψ	Umrechnungsfaktor bei der äquivalenten Sandrauheit	[-]

Verzeichnis der Indize

Indiz :	bezieht sich auf :
ber	eine berechnete Größe
Diff	die Differenz zwischen zwei Größen, die in zwei verschiedenen Messstationen am Bach gemessen wurden
DS	die Deckschicht der Sohle
F	bei λ benutzt, bezieht sich auf den Formwiderstand
gem	eine gemessene Größe
ges	den gesamten Fluss-Schlauch
H	ein Wasserspiegelgefälle, das zwischen den Profilen Q1 und W2 bei der Referenz-Strecke R1 flussabwärts vom Profil Q1 bestimmt wird
Im	den Impulsaustausch selbst
I	den ersten Teilbereich des Querschnitts (s. Abschnitt 3.2.3.1.1) bei kompakten gegliederten Querschnitten
II	den zweiten Teilbereich des Querschnitts (s. Abschnitt 3.2.3.1.1) bei kompakten gegliederten Querschnitten
III	den dritten Teilbereich des Querschnitts (s. Abschnitt 3.2.3.1.1) bei kompakten gegliederten Querschnitten
init	den initialen (direkt gemessenen bzw. berechneten) Wert der Größe
k	den Knick der Böschung an der rechten Ufer des Profils Q1
Ko	bei λ benutzt, bezieht sich auf den Kornwiderstand
li	die linke Böschung
M	ein Wasserspiegelgefälle, das zwischen den Profilen „06.53“ und RB1 bei der Referenz-Strecke R1 bestimmt wird
max	den maximalen Wert der Größe
min	den minimalen Wert der Größe
nom	bei Q benutzt, bezieht sich auf den nominalen Wert des Durchflusses (eingestellt)
re	die rechte Böschung
So	die Sohle

T	eine Trennfläche
US	die Unterschicht der Sohle
Veg	die einzelnen Vegetationselemente
m	einen mittleren Wert
o	bei v benutzt, bezieht sich auf eine rechnerische interaktionsfreie Fließgeschwindigkeit
frei	einen vegetationsfreien Bereich
Bz	eine Bewuchszone

Verzeichnis der Hochstellungen

Hochstellung :	bezieht sich auf :
(D)	eine Größe, die anhand von der Überlagerung nach DVWK-91 berechnet wurde
(i) – i = 1 bis 4	eine Sandrauheit, die mit der Annahmenkombination (i) rückgerechnet wurde (s. Abschnitt 4.4.3.1.2)
(I3)	eine Größe, die anhand der Überlagerung nach Indlekofer 2003 berechnet wurde
(I5)	eine Größe, die anhand der Überlagerung nach Indlekofer 2005 berechnet wurde
(m)	eine Größe, die anhand des Mertens-Verfahrens berechnet wurde
(s)	eine Größe, die anhand des Specht-Verfahrens berechnet wurde
*	eine aus direkt gemessenen Parametern abgeleitete (bzw. rückgerechnete) Größe

Abkürzungen

D.W.-Gl	Darcy-Weisbach Gleichung
G.M.S-Gl	Glauckler-Manning-Strickler Gleichung
V.E.	Vergleichsebene
H4	Herbst 2004
H5	Herbst 2005
F5	Frühjahr 2005
(YX-a)	Nach einer Größe benutzt. Dies präzisiert unter welchem Zustand die Größe bestimmt wird : - in der Jahreszeit Y (H oder F) - bei $Q_{\text{nom}} = a \text{ m}^3/\text{s}$ ($a = 4; 6 \text{ oder } 10$)

1. Einleitung – Aufgabenstellung

Die ingenieurbilogische Bauweise ist eine wirtschaftliche, dauerhafte Lösung zur Böschungs- und Erosionssicherheit bei der Gestaltung von Fließgewässern. Sie leistet außerdem eine gute ökologische Funktionsfähigkeit. Daher wird sie bei entsprechenden hydraulischen Randbedingungen immer häufiger angewendet.

Im Rahmen der Hochwassersicherheit sind seit den 80er Jahren neue Berechnungsmethoden zur Behandlung dieser naturnah gestalteten Fließgewässer entstanden. Das Ziel besteht insbesondere darin, den Einfluss des Bewuchses auf die hydraulische Leistungsfähigkeit zu quantifizieren und die zahlreichen und komplex wirkenden Parameter zu beherrschen. Diese Berechnungsmethoden sind bis heute noch Forschungsthemen.

Zur Berechnung der Durchflüsse bzw. der Wasserspiegellagen sind je nach Eigenschaften der Gewässer verschiedene Verfahren verfügbar. Die Aufgabe dieser Diplomarbeit besteht darin, verschiedene Durchflussberechnungsmethoden (nach Mertens (1989), Specht (2002), Indlekofer (2003 und 2005)) zu untersuchen, um eine plausible Modellierung der wirkenden Fließverluste (insbesondere aufgrund des Böschungsbewuchses) in einem ausgewählten Profil am Russbach vorzuschlagen.

Der Russbach ist ein Teil des Machfeldkanal-Systems (NÖ). Dieses im Jahre 1992 in Betrieb genommene Bewässerungsnetz wurde naturnah gestaltet. Die für die Instandhaltung des Gewässers notwendigen Bewuchspflegemaßnahmen sind daher in engem Zusammenhang mit der hydraulischen Leistungsfähigkeit.

Basis der Arbeit ist die Empfindlichkeitsuntersuchung (Sensitivitätsanalyse) der verschiedenen Berechnungsmethoden im Verhältnis zu den Eingangsparametern. Aus den zwischen 2004 und 2005 von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal und dem hydraulischen Dienst des Landes NÖ durchgeführten Durchfluss- und Wasserstandmessungen wird jeder Eingangsparameter mit einem plausiblen Vertrauensbereich bestimmt. Dann wurde die Wirkung dieser Fehler auf die Genauigkeit der berechneten Größen untersucht.

2. Böschungsbewuchs – Zweck, Wirkung Pflege u. Zustandhaltung

Die Umgestaltungsmaßnahmen an einem naturnahen Fließgewässer umfassen unter anderem die Pflanzung von Gehölzen mit Zielsetzung der dauerhaften und effektiven Böschungssicherung und der Schaffung eines möglichst struktur- und artenreichen Lebensraumes. Zu diesem Zweck wurden am Russbach (Machfeldkanal-System) diverse Weidearten in den unteren Böschungsbereichen, standortheimische Heckengehölze und Einzelbäume in den oberen Böschungsbereichen sowie auf den Dammaußenseiten gepflanzt. Der zu erreichende Bewuchszustand ist eine abwechslungsreiche Bachlandschaft mit einem maximalen Anteil an gehölzbestandenen Flächen von 35%.

Um diesen Zustand zu erhalten, muss der Böschungsbewuchs gepflegt werden. Dazu muss die hydraulische Leistungsfähigkeit des Baches gewährleistet und ein möglichst strukturreicher Lebensraum erhalten werden. Dafür muss für jede Pflanzenart ein eigener Rhythmus befolgt werden:

- Für die Gehölze ist ein altersgestufter Bestand aufzustellen. Zusätzlich ist ein regelmäßiges Entfernen der einhängenden Äste durchzuführen, um das notwendige Lichtprofil zu gewährleisten.
- Die Wiesenflächen sind einmal pro Jahr zu mähen, um eine Verbuschung der Flächen zu vermeiden und ein dichtes Gras zu erhalten.
- Die Röhrichtssäume sind in einem dreijährigen Rhythmus zu mähen. Die aufkommenden Gehölze sind zu entfernen.

Die Wirkung auf die hydraulische Leistungsfähigkeit der notwendigen Abstockung, Auslichtung, Entfernung der Äste sind zu untersuchen. Mehrere Pflegestrategien sollen auch verglichen werden, um den besten Kompromiss zwischen Pflegeaufwand und ökologischer und hydraulischer Leistungsfähigkeit zu finden. [MFK, 2007]

3. Hydraulische Leistungsfähigkeit

Das endgültige Ziel hydraulischer Untersuchungen an einem Fließgewässer ist die Ermittlung der Wasserspiegellage entlang des Flusses. Am Russbach ist gewünscht, die Wasserspiegellage für unterschiedliche Bewuchszustände bei maximalem Durchfluss (HQ100) zu bestimmen. Damit kann man festlegen, ob dieser Durchfluss zu Überflutungen führt oder nicht, d.h., ob die hydraulische Leistungsfähigkeit des Baches gewährleistet ist. Zu diesem Zweck ist unter Annahme eines leicht ungleichförmigen Abflusses die Bernoulli-Gleichung vorhanden. Mit der Darstellung im Bild 1 führt sie zu [DITTRICH, 1998]:

$$[1] \quad W_{sp_i} = W_{sp_{i+1}} + \frac{1}{2 \cdot g} \left(\left(\frac{Q}{F_{i+1}} \right)^2 - \left(\frac{Q}{F_i} \right)^2 \right) + x_{Diff} \cdot I_E$$

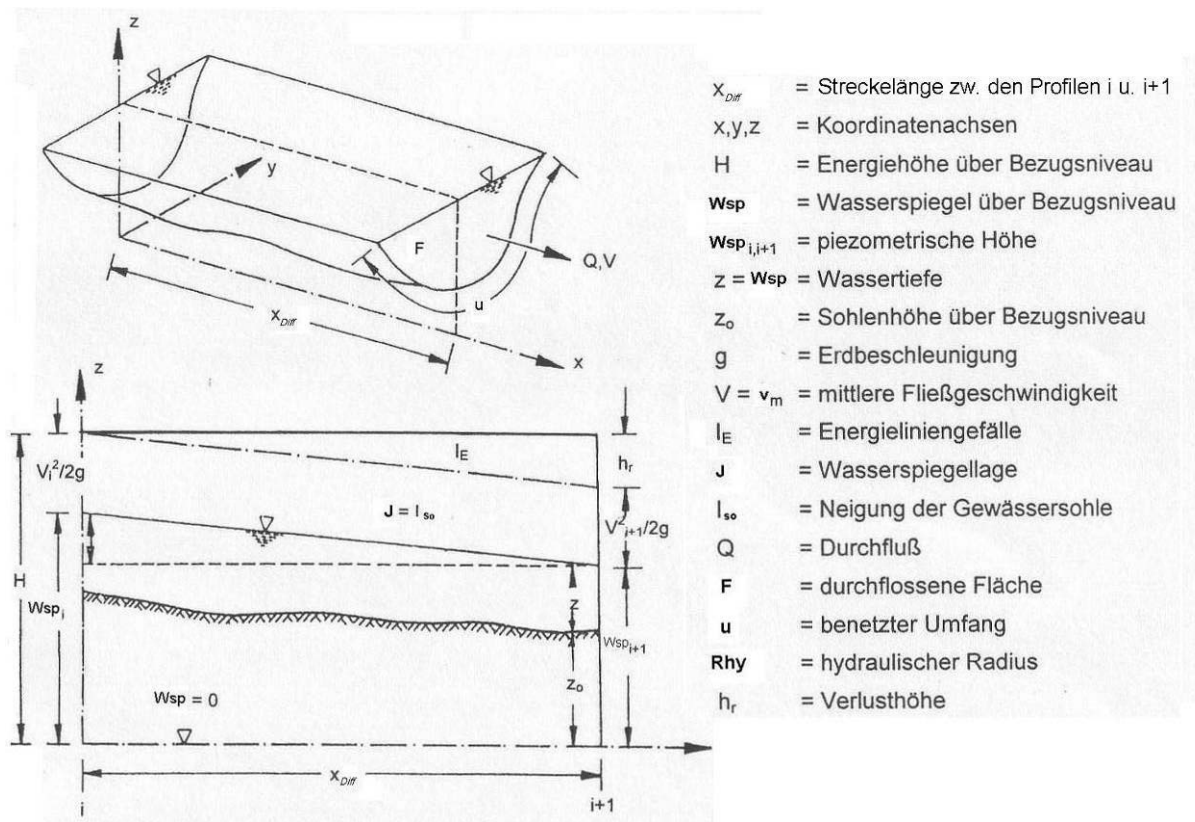


Bild 1 : Definitionsskizze der Energiehöhenbilanz [DITTRICH, 1998]

Q , F_i und x_{Diff} sind in der Gleichung [1] gegebene Größen. Zur iterativen Berechnung der Wasserspiegelhöhe ist nur noch das Energieliniengefälle I_E zu bestimmen. Dies kann anhand von Fließformeln durchgeführt werden. Die ursprünglichen Formen dieser Fließformeln gelten nur für Flüsse mit einheitlichen Rauheiten. Zur Anwendung bei naturnahen Gerinnen, die mit mehreren Rauheiten charakterisiert werden, sind diese Formeln an Querschnitte mit uneinheitlichen Rauheiten anzupassen.

3.1. Fließformeln und –widerstände bei Querschnitten mit einheitlicher Rauheit

Die semi-empirischen Fließformeln, die für die Bestimmung des Durchflusses in einem offenen Gerinne benutzt werden, sind nur unter bestimmten Voraussetzungen gültig.

3.1.1. Notwendige Eigenschaften des Abflusses für die Anwendung der Fließformeln

Man darf die Fließformeln anwenden, wenn:

- Der Abfluss **strömend** ist.
- ein **gleichförmiger** Abfluss vorliegt: Die charakteristischen Parameter des Abflusses (z.B. Fließtiefe, Fließgeschwindigkeit) ändern sich entlang des Fließweges nicht. Für naturnahe Gerinne ist diese Bedingung aufgrund der Strukturdiversität nicht vorhanden, aber für Gerinne wie den Russbach kann die Annahme eines leicht ungleichförmigen Abflusses gemacht werden. Die Änderung der Wasserspiegellage wird auf relativ langen Fließstrecken maßgebend durch die Wand- und Sohlenwiderstände beeinflusst.
- Der Abfluss **stationär** ist. Die Annahme kann bei naturnahen Fließgewässern während einer nicht zu langen Zeit gemacht werden.
- im Querschnitt keinen wesentlichen Fließgeschwindigkeitsunterschied gibt. (s. Abschnitt 3.2 die Definition eines **kompakten Querschnitts**). Unter dieser Annahme kann der Abfluss **eindimensional** modelliert werden.

3.1.2. Fließformeln zur Verfügung

Die unter diesen Voraussetzungen gültigen Fließformeln ergeben grundsätzlich anhand von Fließbeiwerten eine Beziehung zwischen der Geschwindigkeit (bzw. dem Durchfluss) und dem Energiegefälle.

3.1.2.1. Allgemeine Form von De Chézy

Die meisten heute gebräuchlichen Fließformeln sind auf die im Jahr 1768 von De Chézy formulierte Gleichung zurückzuführen:

$$v_m = C \cdot Rhy^{1/2} \cdot I_E^{1/2}$$

v_m [m/s] :	mittlere Fließgeschwindigkeit
C [m ^{1/2} /s] :	Chézy-Beiwert
Rhy [m] :	hydraulischer Radius

Der Beiwert C erfasst die Einflüsse der Oberflächenrauheit, der Formwiderstände, der Linienführung und der Querschnittsgeometrie auf das Abflussverhalten. Verschiedene Untersuchungen haben die Bestimmung dieses Beiwertes als Ziel gehabt.

3.1.2.2. Universelles Fließgesetz von Darcy-Weisbach (DW-Gleichung)

Henry Darcy und Julius Weisbach haben im 19. Jahrhundert folgende Gleichung entwickelt:

$$[2] \quad v_m = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda}} \cdot Rhy^{\frac{1}{2}} \cdot I_E^{\frac{1}{2}}$$

λ [-] : Widerstandsbeiwert

Sie ist physikalisch begründet und enthält keinen empirischen Beiwert. Sie ist deshalb eine universelle Fließformel. Die Quantifizierung des dimensionslosen Widerstandsbeiwertes kommt aus der Rohrhydraulik. Es wurden verschiedene Ansätze vorgeschlagen, um diesen Wert zu bestimmen.

3.1.2.2.1. Ansätze für die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes λ :

Laut den Untersuchungen von Nikuradse (1933) haben Colebrook und White (1937) [zit. in DFG, 1991] bei Abflüssen in Druckrohren den folgenden Ansatz für die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes λ vorgeschlagen:

$$[3] \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,035 \cdot \text{Log} \left(\frac{2,51}{\sqrt{\lambda} \cdot \text{Re}} + \frac{k}{D \cdot 3,71} \right)$$

Re [-] : Reynoldszahl
 k [m] : Sandrauheit des Rohres
 D [m] : Rohrdurchmesser
 Log : entspricht in der ganzen Diplomarbeit dem dekadischen Logarithmus.

Es wird gezeigt, dass λ für offene Gerinne von den folgenden Parametern abhängt:

$$\lambda = f(\text{Re}, k_s/Rhy, \text{Querschnittsgeometrie}, \text{Rauheitsstruktur}, \text{Linienführung})$$

Bei normalem Abfluss (d.h. bei stationär-gleichförmigem Abfluss, bei dem die Gleichung I_E (Energiegefälle) = I_{s0} (Sohlengefälle) = J (Wasserspiegelgefälle) stimmt) und mit der Umformung $D = 4 \cdot Rhy$ kann die Gleichung [3] an die Hydraulik der offenen Gerinne angepasst werden. Von dort kommt der universelle Ansatz von Colebrook und White [DFG, 1991]:

$$[4] \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,035 \cdot \text{Log} \left(\frac{v}{4,51 \cdot \sqrt{g \cdot Rhy^3 \cdot I_E}} + \frac{k_s}{14,84 \cdot Rhy} \right)$$

k_s [m] : äquivalente Sandrauheit

Bei hydraulisch rauen Gerinnen, bei denen maßgeblich turbulente Abflüsse stattfinden, kann das erste Glied des Logarithmus, das den Einfluss der Zähigkeit darstellt, vernachlässigt werden. Deshalb empfiehlt die DVWK (1991) den folgenden Ansatz für λ :

$$[5] \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \cdot \text{Log} \left(\frac{ks}{14,84 \cdot Rhy} \right)$$

Bei den Gleichungen [4] und [5] wird der Einfluss der Querschnittsgeometrie vernachlässigt. Dieser Einfluss äußert sich aber als ungleichmäßige Schubspannungsverteilung über den benetzten Umfang des Fließquerschnitts. Diese führt zu einer Ungleichförmigkeit des Geschwindigkeitsfeldes und zur Ausbildung von sekundären Strömungszellen, deren Anzahl von dem Verhältnis der Gerinnebreite zur Fließtiefe b/t_w abhängt (s. Bild 2).

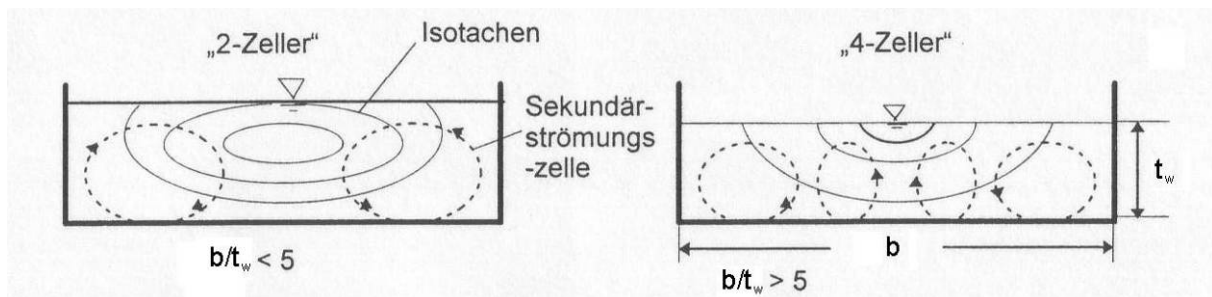


Bild 2 : Isotachen und Sekundärströmungszellen für unterschiedliche Verhältnisse von Fließgewässerbreite b und Wassertiefe t_w [DITTRICH, 1998]

Keulegan (1938) [zit. in DITTRICH, 1998] hat für Gerinne unterschiedlicher Querschnittsgeometrie einen Ansatz für λ vorgeschlagen:

$$\frac{8}{\sqrt{\lambda}} = 2,5 \cdot \text{Ln} \left(\frac{Rhy}{ks} \right) + Br$$

mit

$Br = 6,50$	für kreisförmige Rohre
$Br = 6,27$	für Trapezgerinne ($b/t_w \approx 8$)
$Br = 6,02$	für sehr breite Rechteckgerinne ($Rhy \approx t_w$)

Um genauer den Einfluss des Verhältnisses b/t_w in der Berechnung von λ zu berücksichtigen, hat die DVWK (1990) [zit. in DITTRICH, 1998] die Benutzung eines wirksamen hydraulischen Durchmessers empfohlen: $D_{eff} = f \cdot D = f \cdot 4 \cdot Rhy$, bei dem f ein Formbeiwert ist, der nur von der Querschnittsgeometrie abhängt. Unter dieser Berücksichtigung wird [5]:

$$[6] \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,035 \cdot \text{Log} \left(\frac{ks}{14,84 \cdot f \cdot Rhy} \right)$$

Bei rechteckigen Gerinnequerschnitten hat Söhngen (1987) [zit. in DITTRICH, 1998] den folgenden Ansatz für die Bestimmung von f vorgeschlagen:

$$[7] \quad f = 0,90 - 0,38 \cdot e^{-5 t_w / b}$$

Für unregelmäßige naturnahe Querschnittsgeometrie kann t_w/b anhand eines rechteckigen Ersatzquerschnitts ermittelt werden. Aus dem Bild 3 lässt sich folgende Gleichung erarbeiten:

$$t_w = \frac{F_{ges}}{b_{ges}} \quad [\text{Schröder, R.M.C., 1990 – zit. in CAYUELA, 2005}].$$

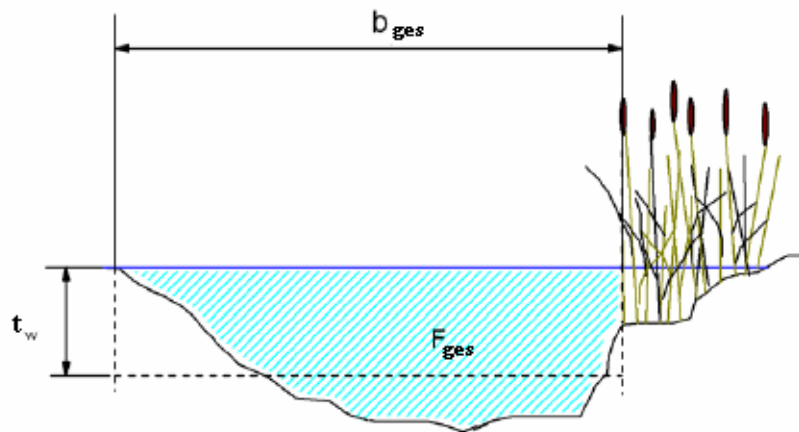


Bild 3 : Ermittlung des rechteckigen Ersatzquerschnitts [CAYUELA, 2005]

Somit wird [7]:

$$[8] \quad f = 0,90 - 0,38 \cdot e^{-5F_{ges}/b_{ges}^2}$$

Für die Bestimmung von λ bei offenen Gerinnen muss noch die Frage nach der Bestimmung der äquivalenten Sandrauheit k_s behandelt werden.

3.1.2.2.2. Bestimmung der äquivalenten Sandrauheit k_s

In der Gleichung [3] von Colebrook und White für Abflüsse in Druckrohren ist die Sandrauheit des Rohres k als Durchmesser eines kugelförmigen Einkornsandes dichtester Lagerung definiert, der auf der benetzten Wandung aufgeklebt wird. Im Gerinne, auch bei Einzelrauheit, ist eine ungleichförmige Rauheit vorhanden, die geometrisch kaum erfassbar ist. Deshalb wird der benetzten Wandung, je nach ihrer Beschaffenheit, eine äquivalente Sandrauheit k_s zugeordnet, die von vielen Abflussgrößen - wie z.B. dem Material der Sohle, der Kornform bei einer Kornmischung oder der Verformung der Sohle - abhängt.

Da diese Abhängigkeit sehr komplex ist, wird oft die äquivalente Sandrauheit k_s empirisch anhand von Tabellen abgeschätzt. Die Tabellen wurden für verschiedene Sohlentypen aus Erfahrung und Untersuchungen erfasst. (s. im Anhang 1 eine solche Tabelle, die die Empfehlungen der DVWK (1991) darstellt.)

Wenn die Oberfläche der Sohle aus einer Kornmischung besteht, ist trotzdem eine Abschätzung von k_s anhand einer Berechnung möglich. Es wird angenommen, dass:

$$k_s = \psi \cdot k_{geo}$$

$\psi [-]$: Umrechnungsfaktor (üblicherweise $1,0 \leq \psi \leq 4,0$)

$k_{geo} [m]$: geometrisches Rauheitsmaß

Das geometrische Rauheitsmaß ist durch einen charakteristischen Korndurchmesser der Sieblinie der Sohle definiert. Es kann sich dabei z.B. um den Durchmesser bei unterschiedlichen Siebdurchgängen, wie den d_{50} , den d_{90} oder um den maßgebenden Durchmesser d_m nach Meyer-Peter und Müller (1949) [zit. in DITTRICH, 1998] handeln. Die Größe d_{50} bzw. d_{90} ist der Durchmesser, der von 50% bzw. 90% der Körner überschritten wird

und $d_m = \sum_{i=1}^n d_i \cdot p_i$ mit:

d_i [m] : mittlerer Korndurchmesser der Fraktion i
 p_i [%] : Prozentualer Anteil einer Kornfraktion

Aber diese Definition von k_s ist empirisch und, wie die Tabelle 1 zeigt, gibt es zahlreiche Empfehlungen für die Bestimmung von k_{geo} und ψ , die sich manchmal sehr stark voneinander unterscheiden.

Autoren:	Empirische Ansätze:
Einstein (1942)	$k_s = d_{65}$
Gabrecht (1961)	$k_s = k_{geo} = d_{90}$
Mahwood (1971)	$k_s = 5,1 \cdot d_{84}$
Ackers/White (1973)	$k_s = 1,25 \cdot d_{35}$
Hey (1979)	$k_s = 3,5 \cdot d_{84}$
Van Rijn (1982)	$k_s = 3 \cdot d_{90}$
Dittrich (1998) :	
- Sohle aus Kiesgemisch :	$k_s = 3,5 \cdot d_m$
- Sohle aus Grobkiesgemisch :	$k_s = 3,5 \cdot d_{84}$

Tabelle 1 : Verschiedene vorhandene Ansätze für die Bestimmung der äquivalenten Sandrauheit k_s [DITTRICH, 1998 und SPECHT, 2002]

Zusätzlich präzisieren diese Empfehlungen nicht, ob die charakteristischen Durchmesser aus der Sieblinie der Unterschicht oder der Deckschicht der Sohle entnommen werden müssen. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen ist die folgende Abschätzung eine ziemlich gute Annäherung, die auch in der Folge dieser Diplomarbeit benutzt werden wird [s. CAYUELA, 2005]:

$$[9] \quad k_s = d_{m,DS} = d_{90,US}$$

$d_{m,DS}$: maßgebender Durchmesser der Deckschicht
 $d_{90,US}$: d_{90} der Unterschicht

Bei diesen oben eingeführten rechnerischen Ansätzen für die äquivalente Sandrauheit der Sohle k_s wird nur der Kornwiderstand der Sohle betrachtet. Wenn der Geschiebetransport in dem Gerinne nicht vernachlässigbar ist, so dass er zu Sohlverformungen, wie zum Beispiel Riffeln oder Dünen, führt, muss auch bei der Bestimmung des Sohlwiderstandes ein Formwiderstand berücksichtigt werden. Mertens (1989) teilt daher den Sohlenwiderstand λ_{so} , bei dem λ_{Ko} anhand der oben eingeführten Sandrauheit k_s definiert ist, in zwei Komponenten auf: $\lambda_{so} = \lambda_{Ko} + \lambda_F$.

λ_{Ko} [-] : Kornwiderstandsbeiwert
 λ_F [-] : Formwiderstandsbeiwert

Da der untersuchte Russbach ein sehr kleines Gefälle (Größenordnung 0,3‰) aufweist, und aus seinem Einzugsgebiet kein nennenswerter Sedimenteintrag erfolgt, wirkt sich der Geschiebetransport im Russbach kaum auf die Sohle aus. Deshalb wird die Frage der Bestimmung des Formwiderstandes λ_F nicht weiter verfolgt und bei unserer Studie nur die Kornrauheit für die Bestimmung des Sohlwiderstandes berücksichtigt.

3.1.2.3. Fließformel von Gauckler, Manning und Strickler (GMS-Gleichung)

Neben der Darcy-Weisbach-Gleichung wird auch die folgende Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung sehr häufig angewendet:

$$[10] \quad v_m = k_{St} \cdot Rhy^{\frac{2}{3}} \cdot I_E^{\frac{1}{2}}$$

$k_{St} [m^{1/3}/s]$: Strickler-Beiwert

Im Gegensatz zu der Darcy-Weisbach-Gleichung ist diese Formel physikalisch nicht begründet. Der Strickler-Beiwert k_{St} , der entlang des benetzten Umfangs den auftretenden Abflusswiderstand charakterisiert, kann messtechnisch nicht erfasst werden und kann daher nur anhand von empirischen Daten für jeden Oberflächentyp bestimmt werden. Es gibt auch dafür umfangreiche tabellarische Zusammenstellungen.

Der Hauptvorteil dieser Formel liegt in ihrer einfachen mathematischen Handhabung. Aber da der Strickler-Beiwert nicht dimensionslos ist, hängt er grundsätzlich von den absoluten Größen des Gerinnes und insbesondere von der Wassertiefe ab. Die Schätzwerte aus den Tabellen sind also nur für eine beschränkte Kombination der Charakteristika des Gerinnes gültig, bei denen die Abhängigkeit vernachlässigt werden kann (s. folgenden Abschnitt 3.1.3). Als gesamter Parameter definiert, kann er gut die gesamte Wirkung der Fließverluste infolge von Oberflächenrauheit, Formwiderstand, Querschnittsgeometrie und Linienführung widerspiegeln. Als Schätzwert eignet er sich aber nicht für die Berechnung von räumlich begrenzten Schubspannungen. Daher wird heutzutage eher die GMS-Gleichung, die diese Probleme beseitigt, bevorzugt.

3.1.3. Beziehungen zwischen dem Strickler-Beiwert k_{St} und der äquivalenten Sandrauheit k_s

Das Gleichsetzen der beiden Fließformeln ([2] und [10]) gibt weitere Informationen zum Strickler-Beiwert und erlaubt, den Beiwert auch bei Berechnungen von Einzelrauheiten zu benutzen (s. [INDLEKOFER, 2003]).

Aus Gleichsetzen der beiden Fließformeln folgt:

$$[11] \quad k_{St} = \left(\frac{8 \cdot g}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot Rhy^{-\frac{1}{6}}$$

Aus der Umschreibung der Gleichung [11] und anhand des Ansatzes [5] für die Definition von λ lässt sich folgende Gleichung erarbeiten [KNAUF, 2003]:

$$[12] \quad k_{St} = \frac{17,72}{Rhy^{1/6}} \cdot \text{Log} \left(\frac{14,84 \cdot Rhy}{ks} \right) = \frac{A \left(\frac{Rhy}{ks} \right)}{ks^{1/6}}$$

wobei :

$$A = \frac{17,72}{\left(\frac{Rhy}{ks} \right)^{1/6}} \cdot \text{Log} \left(\frac{14,84 \cdot Rhy}{ks} \right) [m^{1/2}/s]$$

Indlekofer (2003) hat eine andere äquivalente Schreibweise der Gleichung [12] benutzt:

$$[13] \quad k_{St} = \frac{26}{(\kappa \cdot ks)^{1/6}} \quad \text{mit} \quad \kappa = \frac{\left(1,467 / \text{Log} \left(\frac{14,84}{ks/Rhy} \right) \right)^6}{ks/Rhy}, \text{ Korrekturbeiwert}$$

Knauf (2003) hat das Verhältnis von A in Abhängigkeit von Rhy/ks studiert.

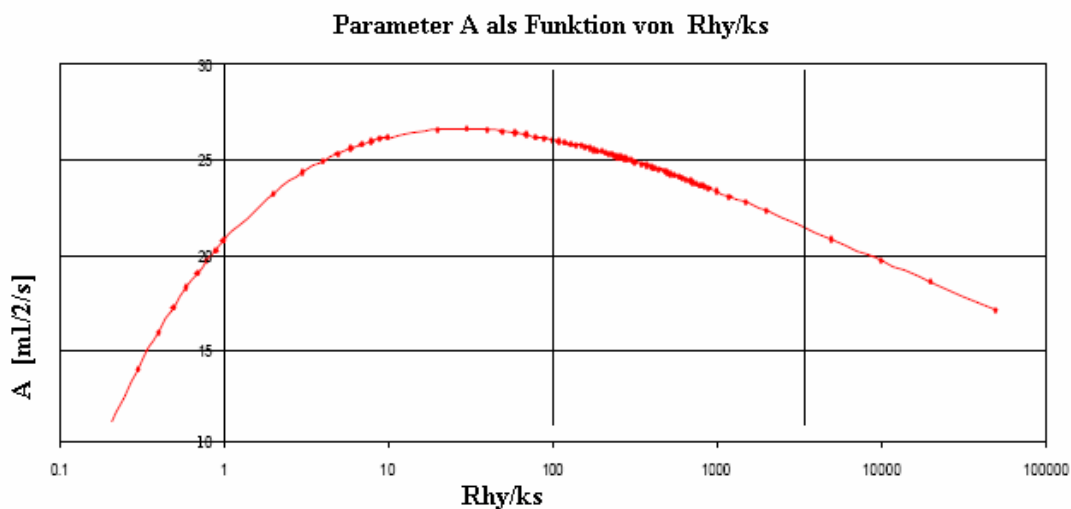


Bild 4 : Parameter A in Funktion von dem Verhältnis Rhy/ks [Knauf, 2003]

Aus der im Bild 4 dargestellten Kurve entnehmen wir, dass die Funktion $A(Rhy/ks)$ im Bereich $10 \leq \frac{Rhy}{ks} \leq 100$ [KNAUF, 2003] bzw. $\frac{ks}{Rhy} \leq 0,12$ (so genannter Nikuradse-Bereich – s. [INDLEKOFER, 2003]) als konstant $A \approx 26 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ angenommen werden kann. In diesem Bereich wird die Gleichung [12]:

$$k_{St} = \frac{26}{ks^{1/6}} \quad \text{für} \quad 10 \leq \frac{Rhy}{ks} \leq 100 \quad \text{bzw.} \quad \frac{ks}{Rhy} \leq 0,12$$

Daher kann in diesem Bereich der Strickler-Beiwert k_{St} unabhängig von den absoluten geometrischen Größen des Querschnitts und insbesondere von der Fließtiefe angenommen werden.

Die hier eingeführten Fließformeln sind nur für eine einheitliche Rauheit im Querschnitt gültig. Sie können nicht direkt bei naturnahen Fließgewässern angewendet werden. Es wird deshalb im Weiteren gezeigt, wie die naturnahen Querschnitte behandelt bzw. modelliert werden können, damit eine Berechnung des gesamten Flussbeiwertes, der die Einflüsse aller im Querschnitt vorhandenen Rauheiten widerspiegelt, möglich wird.

3.2. Anwendung der Fließformeln in naturnahen Querschnitten

→ Was ist „naturnah“?

Der Begriff „naturnah“ entspricht nicht nur einer einfachen Begründung eines Lebensraumes. Er wird angewendet, um einen präzisen ökologischen Zustand eines Lebensraumes bzw. Gewässers zu definieren. 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 (s. Tabelle 2), bei der der Begriff „naturnah“ eine dieser Stufen charakterisiert.

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

Tabelle 2 : 8-stufige Skala nach ELLENBERG für die Bewertung des Vegetationszustandes eines Lebensraumes

Bei naturnahen Vegetationsformen sind die Artengefüge und Schichtenaufbauten der Vegetationseinheiten von den beeinflussten Standortbedingungen geprägt und wurden durch Nutzung kaum verändert. Unter solchen Bedingungen verjüngen sich z.B. die Baumschichten ohne Pflanzung, Saat oder Bodenbearbeitung.

Die Graduierung zwischen „naturbetonten“ und „kulturbetonten“ Vegetationsformen ist eine Folge der anthropogenen Nutzung der Landschaft. Für die Pflege der Fließgewässer ist das ökologische Optimum unter Wahrung der anthropogenen Nutzungen, die Natur- und Landschaftsgerecht sein sollen, anzustreben.

→ Grundsätzliche Querschnittstypen bei naturnahen Fließgewässern

Aufgrund ihrer unregelmäßigen Geometrie, ihres häufigen Vegetationsbestandes und ihrer oftmals inhomogenen Oberflächenrauheit weisen die naturnahen Fließgewässer komplexe Querschnitte auf, die genau zu charakterisieren sind, um zuverlässige Berechnungsergebnisse zu erhalten. Zu diesem Zweck unterscheidet LEHMANN (2005) 7 Typen von naturnahen Querschnitten, die im Bild 5 zusammengestellt sind.

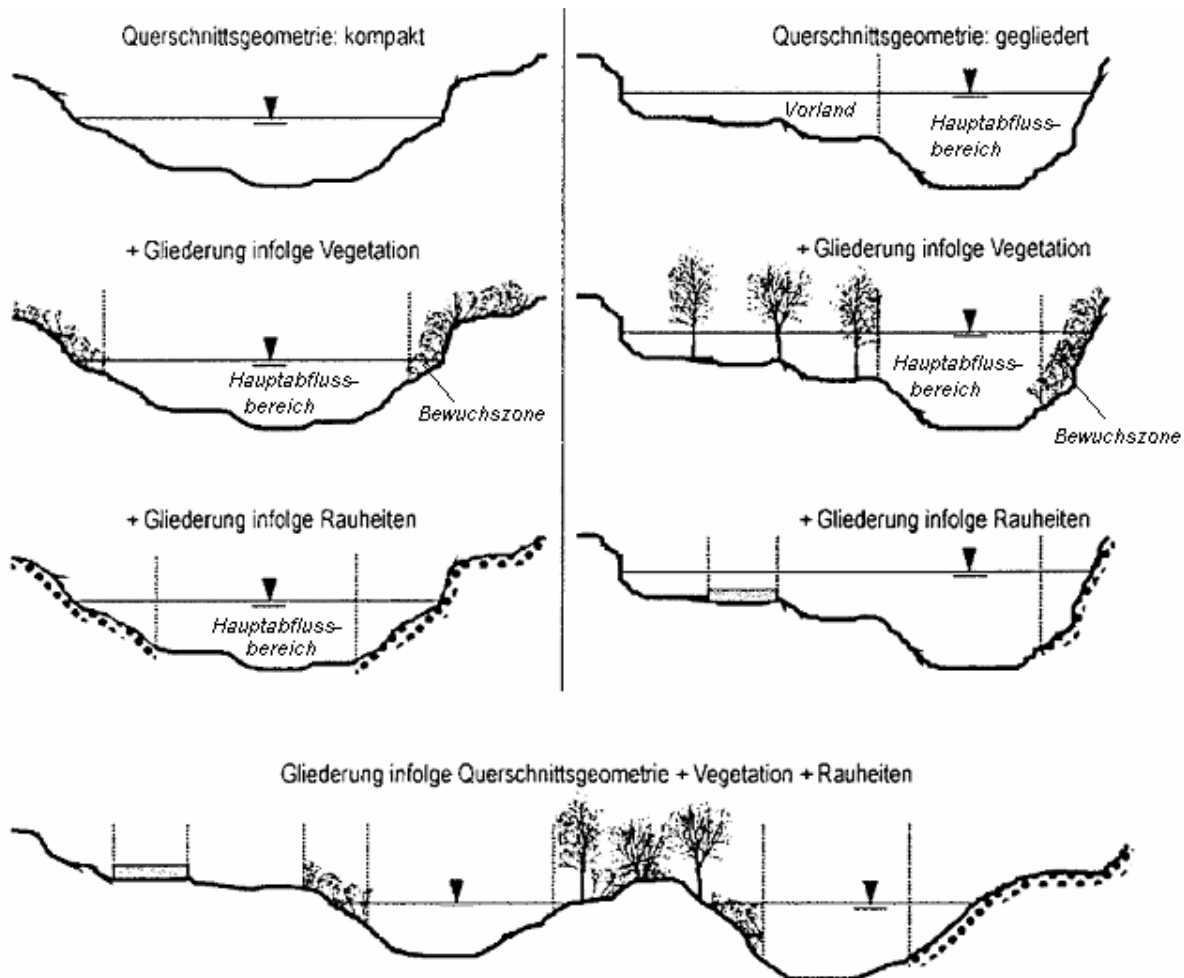


Bild 5 : Exemplarische Klassifizierung naturnaher Fließgewässerquerschnitte anhand der Abflusswiderstände infolge von Geometrie, Vegetation und Oberflächenrauheit [verändert nach LEHMANN, 2005]

Die Kriterien der Charakterisierung jedes Typen entsprechen den Parametern, die die eindimensionale Eigenschaft des Abflusses durch den Querschnitt abschaffen können. Die Kriterien sind:

- Die **Verteilung der Fließtiefe** entlang des Querschnitts. Ein starker Fließtiefenunterschied kann zu einem deutlichen Fließgeschwindigkeitsunterschied führen, so dass der Abfluss nicht mehr eindimensional betrachtet werden kann (die Gleichung $v_i = v_m$ wird nicht mehr für jeden Teil i des gesamten Querschnitts gewährleistet). Laut Naudascher (1987) [zit. in CAYUELA, 2005] ist die Grenze der 1-D Annahme erreicht, wenn die mittlere Fließtiefe des niedrigeren Bereiches 70% des tieferen unterschreitet. Dieses Kriterium unterscheidet die zwei Haupttypen von Querschnitten: die **kompakten** Fließgewässerquerschnitte und die **durch die Geometrie gegliederten** Fließgewässerquerschnitte.

- Das **Vorhandensein im Querschnitt von Vegetationszonen**, die insbesondere aus durchströmtem Bewuchs bestehen. In solchen Bereichen führt die Vegetation zu einem bedeutenden Fließwiderstand, so dass die Fließgeschwindigkeit in dieser Zone deutlich kleiner als in dem bewuchsfreien Bereich des Abflusses wird. Daher werden zwei weitere Typen von Querschnitten unterschieden: die infolge von Vegetation gegliederten Querschnitte und die bewuchsfreien Querschnitte. Diese beiden Querschnittstypen können jeweils entweder kompakt oder durch die Geometrie gegliedert werden.

- Der **Rauheitsunterschied zwischen benachbarten Umfangsteilen der Sohle**. Ein extremer Rauheitsunterschied kann auch zu einem wesentlichen Fließgeschwindigkeitsunterschied führen. Das Vorhandensein einer solchen Rauheitsverteilung charakterisiert die durch die Rauheit gegliederten Querschnitte.

Durchströmte Vegetationszone, große Fließtiefenunterschiede und extreme Rauheitsunterschiede führen zu der Abschaffung der eindimensionalen Eigenschaft des Abflusses. Um die Fließformeln trotzdem in einem naturnahen Querschnitt, der solche Elemente aufweisen kann, benutzen zu dürfen, ist dieser Querschnitt anhand von fiktiven Trennflächen zu gliedern, so dass in jedem Teilbereich¹ des gesamten Querschnitts (z.B. Hauptabflussbereich², Bewuchszone, Vorland, s. Bild 5) der Abfluss wieder 1-D angenommen werden darf und die Fließformel wieder gültig wird. Es wird weiter im Abschnitt 3.2.2.1 gezeigt, dass man fiktiven Rauheiten diese Trennflächen zuordnen muss. Das Vorhandensein von den oben aufgezählten Elementen führt nämlich zu Impulsaustauschen und Wirbelungen zwischen den gegliederten Teilquerschnitten, die als Fließwiderstand wirken. Sind uneinheitliche Rauheiten vorhanden, die nicht extrem genug sind, um lokale Impulsaustausche zwischen Teilbereichen des Querschnitts mit sich zu ziehen (der turbulanz-bedingte Impulsaustausch ist in diesem Fall im ganzen Abflussraum wirksam), ist der Querschnitt als nicht gegliedert zu betrachten.

Eine weitere Querschnittseigenschaft zur umfangreichen Charakterisierung eines naturnahen Querschnitts besteht in der Bestimmung des hydraulisch wirksamen Teilbereiches. Es handelt sich darum, die Bereiche, bei denen der Durchfluss vernachlässigbar ist, zu identifizieren. Der Durchfluss wird in diesen Bereichen nicht weiter untersucht.

Anhand der eingeführten Gliederungen des naturnahen Querschnitts sind die im vorigen Abschnitt präsentierten Fließformeln in jedem Teilquerschnitt gültig. Aber diese Teilquerschnitte weisen unterschiedliche Rauheiten auf, die mit den bisher eingeführten Definitionen der Fließwiderstände nicht übereinstimmen. In den folgenden Abschnitten werden die Methoden zur Bestimmung der gesamten Fließbeiwerte komplexer Querschnitte präsentiert.

¹ Ein Teilbereich des gesamten Querschnitts (syn. Teilquerschnitt, Querschnittsteil, Teilbereich) ist von vertikalen Trennflächen begrenzt

² Hauptabflussbereich (syn. Fluss-Schlauch) = gehölzfreier kompakter Querschnittsteil

3.2.1. Überlagerungsverfahren der Fließwiderstände bei kompakten, nicht gegliederten Querschnitten

Für kompakte nicht gegliederte Querschnitte mit uneinheitlichen Rauheiten ohne extreme Gliederung (z.B. ein Gerinne dessen Sohle aus Kies besteht und dessen Böschungen mittels Steinschüttungen befestigt wird) haben Horton (1933) und Einstein (1934) [zit. in LEHMANN, 2005] eine gewichtete lineare Überlagerung der verschiedenen äquivalenten Sandrauheiten k_{si} entwickelt. Das Verfahren weist durch fiktive Trennlinien jeder Rauheitssektion eine hydraulisch-wirksame Teilfläche³ F_i des gesamten Querschnitts (bzw. eines Teilbereiches des gesamten Querschnitts) zu. Ausgehend von der Gerinnewandung verlaufen die fiktiven Trennlinien senkrecht zu den Isotachen bis zum freien Wasserspiegel (s. Bild 6), so dass aus turbulenz-theoretischen Gründen kein Impulsaustausch zwischen diesen Teilflächen F_i stattfindet.

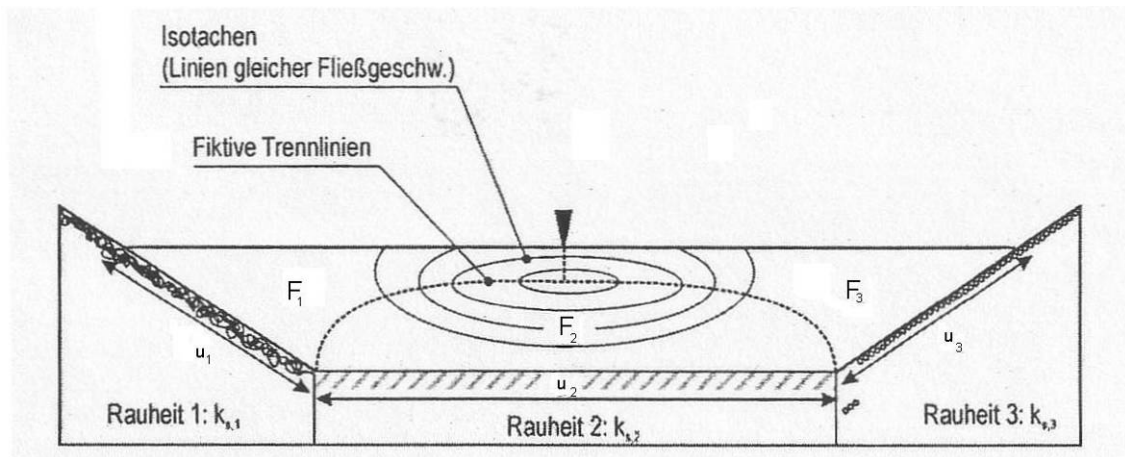


Bild 6 : Sektionierung eines Querschnitts mit unterschiedlichen Oberflächenrauheiten in Teilflächen [Horton, 1933 - zit. in LEHMANN, 2005]

In jeder Teilfläche F_i , bei der nur die Rauheit k_{si} wirkt, kann anhand der oben eingeführten Ansätze für die Bestimmung der Widerstandsbeiwerte (s. Abschnitt 3.1.2.2.1) ein λ_i berechnet werden. Dafür können die hydraulischen Radien R_{hy_i} jeder Teilfläche F_i anhand der folgenden Definition ermittelt werden.

$$[14] \quad R_{hy_i} = \frac{F_i}{u_i}$$

Wobei die folgende Voraussetzung überprüft werden muss:

$$[15] \quad \sum_{i=1}^n F_i = F_{ges}$$

Die R_{hy_i} können nur iterativ ermittelt werden, da die F_i nicht direkt bestimmt werden können.

³ Eine Teilfläche ist von Trennlinien, die senkrecht zu den Isotachen verlaufen, begrenzt und ist anders als ein Teilbereich (s. Fußnote 1 Seite 22).

Unter der weiteren Voraussetzung, dass die mittlere Geschwindigkeit v_i in jeder Teilfläche F_i gleich der mittleren Geschwindigkeit des gesamten Querschnitts v_m ist, können laut Einstein und Horton die einzelnen Widerstandsbeiwerte λ_i wie folgt überlagert werden :

$$[16] \quad \lambda_{ges} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \cdot u_i}{u_{ges}}$$

u_i [m] : Benetzter Umfang einer Teilfläche
 u_{ges} [m] : Benetzter Umfang des gesamten Querschnitts

Die iterative Ermittlung der $R_{hy,i}$ bzw. F_i ist ziemlich aufwändig. Deshalb werden in der Praxis oft die GMS-Gleichung und die Strickler-Beiwerte als Basis für die Überlagerung verwendet. Im Nikuradse-Bereich (s. Abschnitt 3.1.3) sind die Strickler-Beiwerte unabhängig von den Größen des Gerinnequerschnitts, wodurch die Ermittlung der F_i nicht mehr benötigt wird. Die Umschreibung der Gleichung [16] anhand der Strickler-Beiwerte liefert :

$$[17] \quad \frac{u_{ges}}{k_{St,ges}^{3/2}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{u_i}{k_{St,i}^{3/2}}$$

$k_{St,ges}$ [m^{1/3}/s] : Strickler-Beiwert des gesamten Querschnitts
 $k_{St,i}$ [m^{1/3}/s] : Strickler-Beiwert einer Teilfläche

Die Überlagerungsmethode nach Einstein-Horton kann jedoch nicht die Massen- und Impulsaustausche, die bei extremen Rauheitswechseln zwischen den Teilquerschnitten stattfinden, erfassen. Es wird im weiteren Abschnitt gezeigt, wie diese Überlagerungsmethode an gegliederte Querschnitte angepasst werden kann.

3.2.2. Fließverluste in naturnahen gegliederten Querschnitten – Charakterisierung durch hydraulische Kenngrößen

Um alle Fließverluste in einem naturnahen Querschnitt berücksichtigen zu können, sind die zwischen den gegliederten Teilbereichen entstehenden Impulsaustausche als Fließbeiwert zu quantifizieren. Das Konzept der fiktiven rauen Trennfläche wird zu diesem Zweck entwickelt.

3.2.2.1. Konzept der Trennflächen bei (durch Geometrie oder Bewuchs) gegliederten Querschnitten

Wie wir schon oben bemerkt haben, führen bestimmte Elemente eines typisch naturnahen Querschnitts (insbesondere durchströmter Bewuchs, unregelmäßige Geometrie) zu Massen- und Impulsaustauschen zwischen den verschiedenen Querschnittsteilen.

Dieser Interaktionsmechanismus wurde zuerst phänomenologisch beschrieben. Sellin (1964) [zit. in LEHMANN, 2005] beobachtete in seinen Laborversuchen periodische vertikalachsigte Wirbelstrukturen an der Oberfläche eines Gerinnes, dessen Querschnitt durch seine Geometrie gegliedert wird (mit Vorland)(s. Bild 7). Diese Wirbeln rufen Fließverluste im Abfluss hervor.

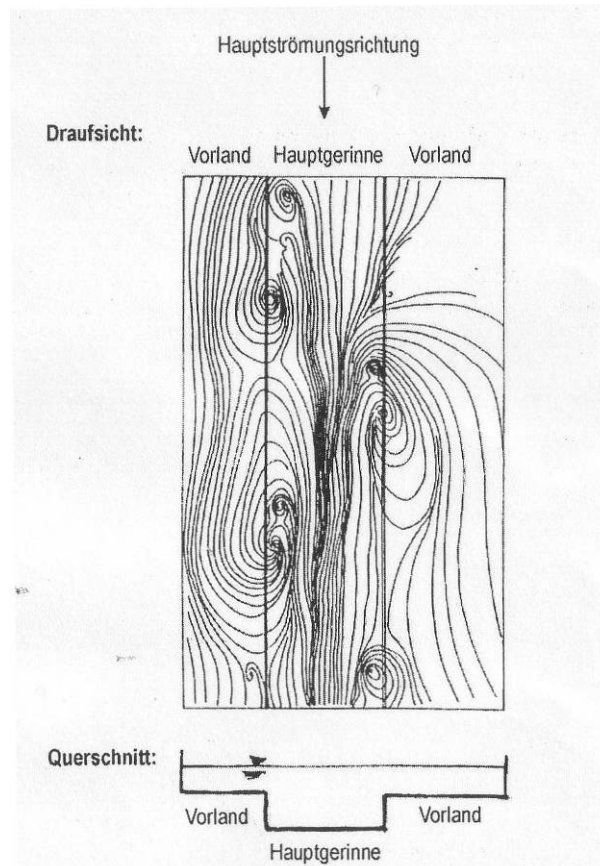


Bild 7: Visualisierte Oberflächenströmung bei den Versuchen von Sellin (1964) [LEHMANN, 2005]

Kaiser (1984) [zit. in LEHMANN, 2005] hob einen lateralen Gradient der Energielinie zwischen dem Vorland und dem Hauptabflussbereich, der zu einem durchpendelnden Abfluss zwischen den beiden Teilquerschnitten führt, hervor. (s. Bild 8).

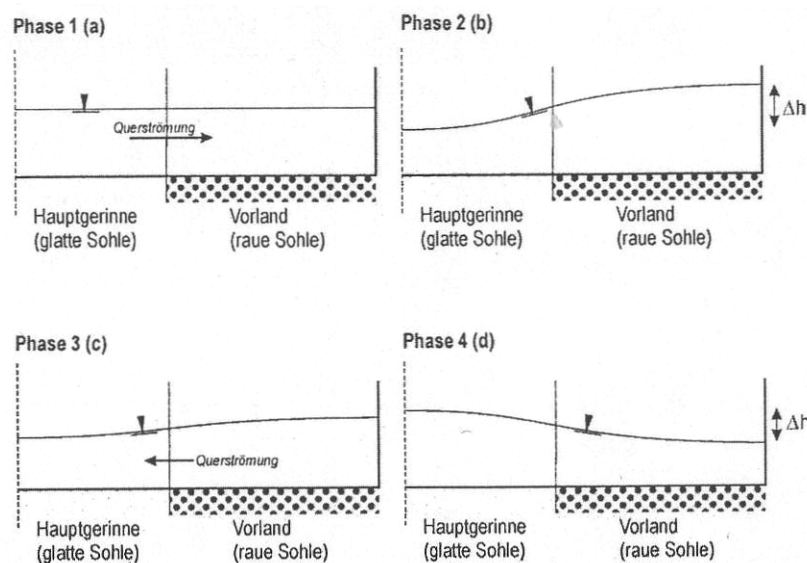


Bild 8 : Queraustausch nach dem Interaktionsmodell von Kaiser (1984) [Lehmann, 2005]

Knight und Shiono (1990) [zit. in LEHMANN, 2005] ermittelten anhand der Laser-Doppel-Anemometrie eine hoch aufgelöste Erfassung des Abflusses in einem zweifach gegliederten Trapezgerinne. Sie beobachteten die Makrowirbeln mit vertikaler Achse von Sellen, aber auch Wirbeln mit horizontaler Achse, die sich in Fließrichtung schraubartig fortsetzen und eine sekundäre Strömung bilden. Dies beeinflusst und bremst weitgehend den Hauptabfluss. Die Skizze des ermittelten Interaktionsmodells ist im Bild 9 dargestellt.

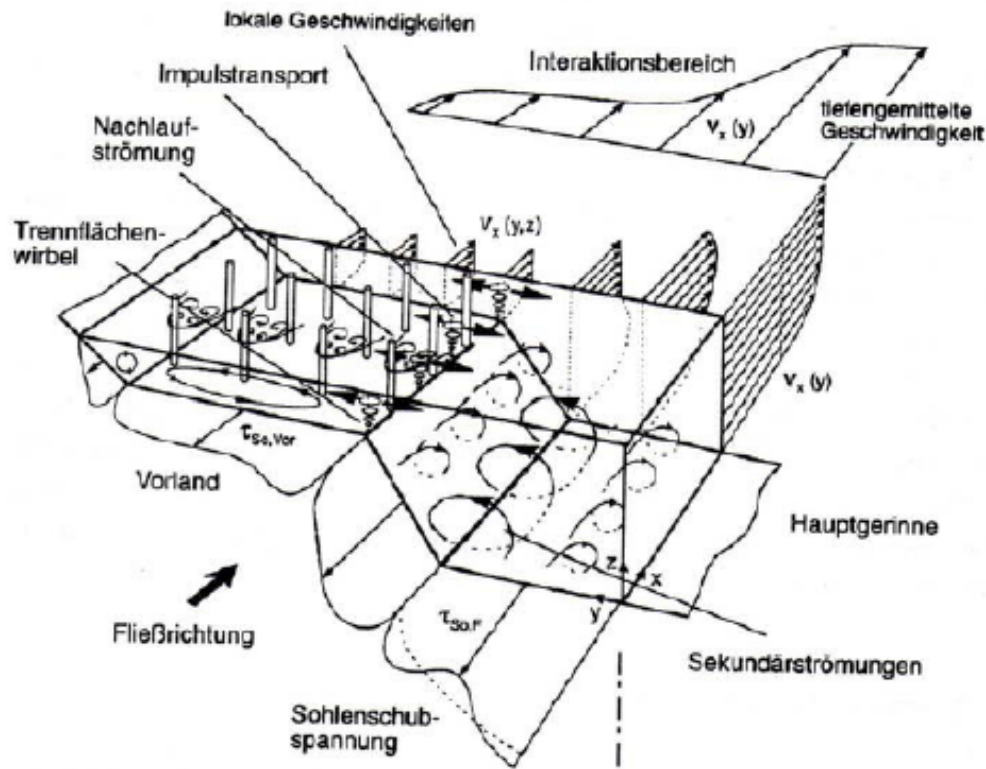


Bild 9 : Interaktionsmodell von Knight und Shiono (1990) [LEHMANN, 2005]

Im Jahre 2001 haben Nezu und Onizuka [zit. in LEHMANN, 2005] den Einfluss der relativen Fließtiefe h_T/t_w auf die Struktur der Sekundärströmung hervorgehoben. Die sekundäre Strömung intensiviert sich bei zunehmender Fließtiefe.

h_T [m] : Höhe der Trennfläche
 t_w [m] : Mittlere Fließtiefe in dem Hauptabflussbereich

Diese, aus den beobachteten Wirbeln resultierenden, Fließverluste sollen in der Bestimmung der im Querschnitt wirkenden Fließwiderstände berücksichtigt werden. Dafür wurde der Impulsaustausch durch eine, in der Trennfläche angesetzte fiktive Rauheit, (bzw. Widerstandsbeiwert λ_T), die zum Fließverlust gleichwertig ist, charakterisiert.

Somit können die Fließverluste, die aus verschiedenen hydraulischen Ursachen entstehen, zumindest rechnerisch nur einem Verlusttyp zugeführt werden – der Rauheit (Widerstandsbeiwert zufolge Rauheit). Daher kann hier auch die für kompakte nicht gegliederte Gerinnequerschnitte geeignete Rauheitsüberlagerung nach Einstein-Horton (s. Abschnitt 3.2.1) in jedem Teilquerschnitt herangezogen werden.

3.2.2.2. Zusammenstellung der verschiedenen Fließverlust-Typen

Zur praktischen Anwendung werden im Bild 10 und in der Tabelle 3 die in einem Teilquerschnitt eines naturnahen Gerinnes eintretenden Fließverlust-Typen zusammengefasst.

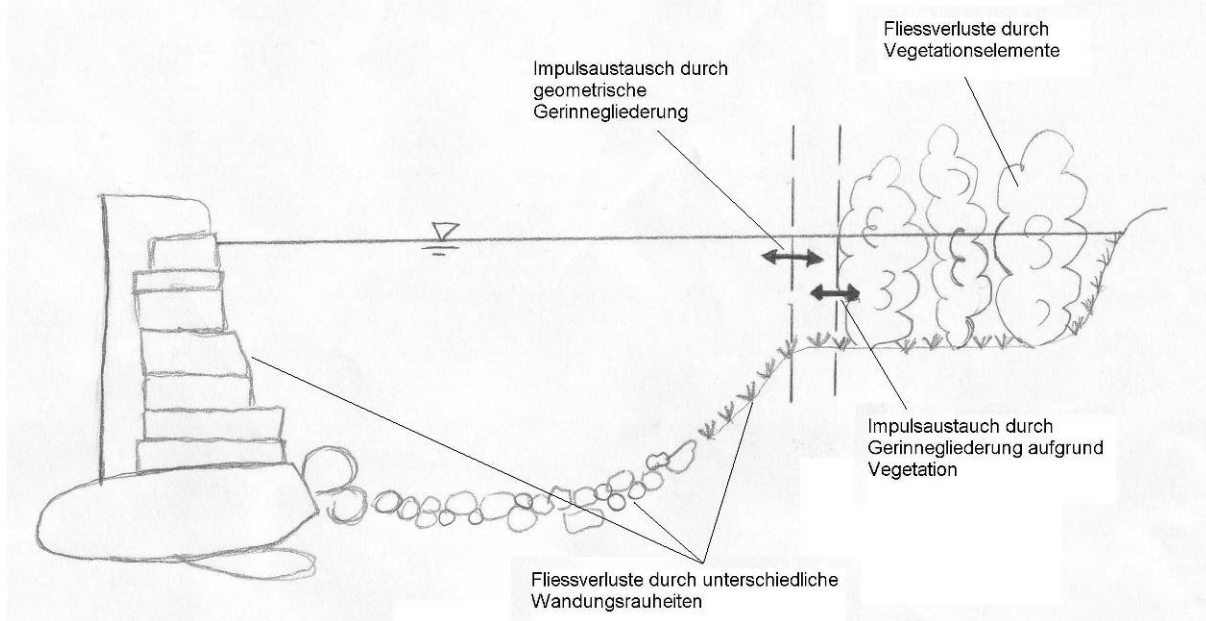


Bild 10 : Darstellung der verschiedenen Fließverlust-Typen bei einem naturnahen Querschnitt

Profil-Element :	Fließverlust infolge von :	entsprechender Widerstandsbeiwert
Wandung (Sohle, Böschung aus Kies - bzw. Sand, Schüttung - oder überströmtem Bewuchs)	äquivalenter Sandrauheit k_s	Sohlenwiderstand λ_{s0} bzw. Böschungswiderstand λ_{B0}
Vorland bzw. Unregelmäßigkeit der Geometrie	Impulsaustausch	Fiktiver Widerstandsbeiwert λ_T – agiert entlang der Trennfläche
Bewuchszone	Impulsaustausch	Fiktiver Widerstandsbeiwert λ_T – agiert entlang der Trennfläche
Bewuchselement	Formwiderstand (Verlust infolge von Druckunterschieden vor und hinter dem Stamm)	Vegetationswiderstand λ_{veg}

Tabelle 3 : Die verschiedenen Fließverlust-Typen bei naturnahen Querschnitten

Da in dem Fall des Russbaches der Durchfluss in der Bewuchszone vernachlässigbar ist (s. Abschnitt 4.3), ist der wirksame Querschnitt der Hauptabflussbereich. Daher wird hier nicht weiter auf die Bestimmung des Vegetationswiderstandes λ_{veg} , der nur in der Bewuchszone Wirkung hat, eingegangen. Die Quantifizierung des fiktiven Trennflächenwiderstandes λ_T ist im weiteren Abschnitt erklärt. Die Bestimmung des Sohlenwiderstandes λ_{s0} wird schon oben, im Abschnitt 3.1.2.2, behandelt.

3.2.3. Vorhandene Berechnungsansätze für die Durchflussermittlung eines bewuchsfreien Teilquerschnitts bei naturnahen Gerinnen

Hier wird der Quantifizierung der Trennflächenrauheit und dem iterativen Verfahren zur Umsetzung der Überlagerungsmethoden nach Einstein-Horton das Hauptaugenmerk zugewendet.

3.2.3.1. Ermittlung des fiktiven Trennflächenwiderstandes λ_T

Nach einer generellen Übersicht über die Geschichte der Forschung bei der Ermittlung der Trennflächenwiderstände wird die Anwendung des Mertens-Verfahrens und deren Ergänzungen präziser behandelt, da – wie im Abschnitt 4.3 nachgewiesen – dieses Verfahren die Untersuchungen am Russbach am besten erlaubt.

3.2.3.1.1. Geschichtliche Entwicklung der Forschung - Hauptpunkte

Mitte der 80er hat die DFG ein Programm zwischen den Universitäten von Hannover, Aachen, Darmstadt und Braunschweig durchgeführt, um den Einfluss von Vegetation auf Vorländer und Böschungen im Hinblick auf die Interaktion in gegliederten Gerinnen zu untersuchen. Im Rahmen dieses Programms wurden verschiedene Verfahren für die Quantifizierung des Interaktionswiderstandes einer Trennfläche vorgeschlagen.

In allen Berechnungsansätzen muss der Querschnitt in vier Teilbereiche aufgeteilt werden (s. Bild 11):

- Bereich I : Vom Impulsaustausch unbeeinflusster Bereich. Die Fließgeschwindigkeit ist hier eine Funktion des überlagerten Bewuchs- und Sohlenwiderstandes.
- Bereich II : Vom Impulsaustausch mit dem Hauptabflussbereich beeinflusster Bereich. Hier sind der Bewuchswiderstand, der Sohlenwiderstand und der fiktive Trennflächenwiderstand wirkend.
- Bereich III : Vom Impulsaustausch mit dem Vorland (bzw. Bewuchsbereich) beeinflusster Hauptabflussbereich. Hier sind der Sohlenwiderstand und der fiktive Trennflächenwiderstand wirkend.
- Bereich IV : Vom Impulsaustausch unbeeinflusster Hauptabflussbereich. Er wird nur vom Sohlenwiderstand geprägt. Dieser Bereich kommt nur bei größeren Flüssen vor.

Die Breite b_{II} des Bereiches II ist nicht direkt messbar und muss rechnerisch abgeschätzt werden. (Eine Abschätzung von b_{III} bzw. b_{IV} wird auch notwendig, wenn der Bereich IV existiert.)

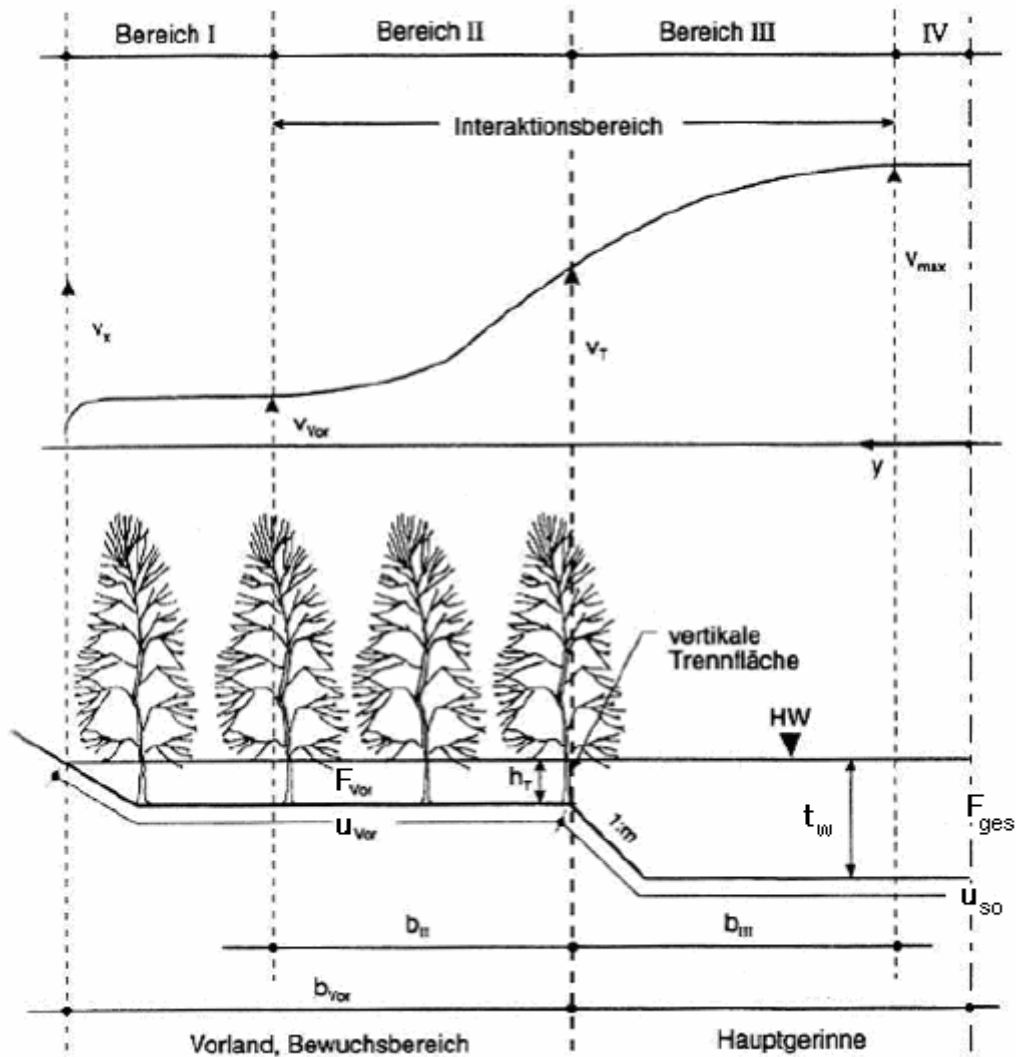


Bild 11 : Aufteilung des Gerinnequerschnitts mit einer Fiktiven vertikalen Trennfläche (aus Schnauder, 2004)
[zit. in CAYUELA, 2005]

Mit Hilfe der drei typischen Querschnittsformen: rechteckig, trapezförmig und trapezförmig mit Vorland werden verschiedene Laborversuchsserien untersucht. Aufgrund ihrer experimentell-empirischen Basis sollen die, von diesen verschiedenen Laborversuchen, ermittelten Ansätze nur eingeschränkt auf die in den Versuchen abgedeckten Parameterkombinationen und Randbedingungen (insbesondere Querschnittsgeometrie) angewendet werden. Im Anhang 2 ist eine tabellarische Zusammenstellung der verschiedenen ursprünglichen Versuche mit ihren Bedingungen vorhanden.

Die Versuche haben sich wie folgt chronologisch aneinandergereiht (alle Autoren außer Specht sind in [LEHMANN, 2005] zitiert):

o Versuche von Kaiser (1984) – Rechteckprofil

Kaiser hat die ersten Versuche in einem rechteckigen Gerinne durchgeführt, bei dem die Vegetation durch umströmte und starre Zylinder simuliert wurde. Daher hat er die folgenden Ansätze vorgeschlagen:

$$\lambda_T = \lambda_{veg} + \lambda_{lm} \quad \text{mit} \quad \lambda_{lm} = 0,18 \cdot \left(\log \left(0,0135 \frac{v_{o,Bz}^2 \cdot (1m)}{v_{o,frei}^2 \cdot h_T} \right) \right)$$

λ_{lm} [-] : Widerstand aufgrund des Impulsaustauschs selbst
 $v_{o,frei}$ [m/s]: rechnerische interaktionsfreie Fließgeschwindigkeit im vegetationsfreien Bereich
 $v_{o,Bz}$ [m/s]: rechnerische interaktionsfreie Fließgeschwindigkeit in der Bewuchszone
 h_T [m] : Höhe der Trennfläche

Kaiser nimmt eine lineare Verteilung der Scheinschubspannung im Trennflächenbereich an.

o Versuche von Pasche (1984) – Profil mit Vorland

Pasche führte 1984 seine Versuche in einem Modell mit einem Doppeltrapezquerschnitt (d.h. mit Vorland) durch. Auch simulierte er wie Kaiser die Vegetation mit starren Zylindern. Er schlägt für den Trennflächenwiderstand den folgenden Ansatz vor:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2,03 \cdot \log \left(\left(\frac{b_{II}}{b_{III}/2} \right)^{1,07} \cdot \Omega \right)$$

b_{II} [m] : Breite des Teilbereiches II (s. Bild 11)
 b_{III} [m] : Breite des Teilbereiches III (s. Bild 11)
 Ω [-] : Bewuchsparameter nach Pasche, wird aus Nachlauflänge und -breite hinter einem Vegetationselement ermittelt.

Pasche nimmt ebenso eine lineare Verteilung der Scheinschubspannung im Trennflächenbereich an. Dieser Ansatz besitzt einen breiten Anwendungsbereich, benötigt aber viel Rechenaufwand.

o Versuche von Bertam (1985) – Trapezquerschnitt

Bertam führte 1985 seine Versuche in einem Modell mit einem einfachen Trapezquerschnitt mit rauer Gerinnesohle und Zylinderanordnung als Vegetationssimulation durch. Er schlägt einen Ansatz für λ_T vor, der formal dem Gesetz für den Widerstandsbeiwert eines Querschnitts mit einheitlicher Rauheit entspricht und definiert eine fiktive Trennflächenrauheit k_T :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = 2,035 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot 3,046 \cdot Rhy_{T, frei}}{k_T} \right) \quad \text{mit} \quad k_T = k_{T, veg} + k_{T, lm}$$

$$\text{Wobei : } k_{T, veg} = (1,2 \dots 1,5) \cdot d_{veg} \quad \text{und} \quad k_{T, lm} = \sqrt[3]{\frac{v_{veg,2}}{v_{veg,1}}} \cdot 0,77 \cdot \frac{F_{II}}{h_T}$$

$Rhy_{T, frei}$ [m] : hydraulischer Radius der durch die Trennfläche beeinflussten Teilfläche des bewuchsfreien Bereiches III
 k_T [m] : fiktive Rauheit der fiktiven Trennfläche
 $k_{T, veg}$ [m] : fiktive Rauheit der durchflossenen Vegetation
 $k_{T, lm}$ [m] : interaktionsbedingte fiktive Rauheit

- o Versuche von Mertens (1989) – Trapezquerschnitt auf Basis von Bertam Untersuchungen

Mertens [MERTENS, 1989] verbesserte den Ansatz von Bertam, indem er die interaktionsbedingte fiktive Rauheit $k_{T,lm}$ modifizierte. Er führte den Bewuchsparameter B, der von den geometrischen Kenngrößen der Bewuchsanordnung abhängt, ein:

$$k_{T,lm} = c \cdot b_{II,m}$$

Wobei $b_{II,m} = \frac{F_{II}}{h_T}$ und der Bewuchsdichtebeiwert c eine lineare Funktion des Bewuchsparameters B ist (s. weitere Details im folgenden Abschnitt 3.2.3.1.2.1).

B [-] : Bewuchsparameter nach Mertens
 F_{II} [m²] : Fläche des Bereiches II
 $b_{II,m}$ [m] : mittlere Breite des Teilbereiches II

Desweiteren nimmt Mertens ebenso wie Bertam zuvor eine lineare Verteilung der Scheinschubspannung im Trennflächenbereich an.

- o Versuche von Nuding (1991) – Rechteckprofil auf Basis von Kaiser Untersuchungen

Nuding (1991) führte seine Versuche in einem rechteckigen Gerinne durch und simulierte die Vegetation mit geformten Maschendrahten und natürlichen starren Zweigen. Daher nahm er eine hyperbolische Scheinschubspannungsverteilung in dem interaktionsbeeinflussten, vegetationsfreien Bereich an und nicht wie bis dahin eine lineare Verteilung.

- o Versuche von Schumacher (1995)

Schumacher wies 1995 nach, dass die Scheinschubspannung keinen linearen Verlauf im durch die Interaktion beeinflussten Vegetationsbereich aufweisen kann. Weiterhin charakterisierte er auch den Einfluss der relativen Fließtiefe (h_T/t_w), der bislang in keinem Ansatz berücksichtigt wurde.

- o Versuche von Specht (2002) – Modifizierung der Pasche- und Mertens-Ansätze

Specht (2002) entwickelte einen Geometriebeiwert c_{geo} , der die Breite b_{II} (bzw. $b_{II,m}$) in den Ansätzen von Pasche bzw. Mertens moduliert. Dieser zusätzliche Parameter erfasst den Einfluss der geometrischen Randbedingungen des Böschungsbewuchses auf die wirkende Breite. Er ist abhängig vom relativen Trennflächenabstand b_{III}/h_T sowie von der relativen Trennflächenhöhe h_T/t_w . (s. weitere Details Abschnitt 3.2.3.1.2.2)

- o Versuche von Schnauder (2004) - Modifizierung des Pasche-Ansatzes

Auf die Empfehlung von Schumacher setzte Schnauder (2004) die Versuche von Pasche mit flexibeln Zylindern als Vegetationsmodelle fort. Anhand dieser neuen Versuche modifizierte er die Bestimmung des Bewuchsparameters Ω .

Da bei dem, in dieser Diplomarbeit, untersuchten Profil des Russbaches kein Vorland vorhanden ist, wird das Verfahren nach Pasche nicht weiter präsentiert. Wie im Abschnitt 4.3 nachgewiesen, ist in dem untersuchten Fall nur das Mertens-Verfahren und seine Ergänzungen von Interesse. Sie werden im folgenden Abschnitt genauer für eine praktische Anwendung präsentiert.

3.2.3.1.2. Anwendung des Mertens-Verfahrens und deren Ergänzung

Mertens hat die ursprüngliche Form seines Verfahrens für trapezförmige Querschnitte im Jahre 1989 publiziert. Dann wurde die Ermittlung der linearen Funktion $c(B)$ und der Breite des von dem Impulsaustausch beeinflussten Bereiches noch verfeinert. Hier wird also nur die von der DVWK (1991) aktuelle empfohlene Form des Mertens-Verfahrens präsentiert. Dann wird die Berechnungsmethode für die Ermittlung des zusätzlichen Parameters c_{geo} nach Specht angegeben.

3.2.3.1.2.1. Berechnungsmethode des Mertens-Verfahrens

Für einen trapezförmigen Querschnitt mit Bewuchs auf der Böschung wird von der DVWK (1991) folgende Berechnung der fiktiven Trennflächenrauheit empfohlen:

$$k_T = 1,5 \cdot d_p + c(B) \cdot b_{II,m}$$

wobei :

- $b_{II,m} = \frac{F_{II}}{h_T}$

F_{II} wird von einer maximalen Breite $b_{II,max}$ begrenzt (s. Bild 12). Die Breite $b_{II,max}$ charakterisiert die hydraulisch größtmögliche Ausdehnung der Makroturbulenz in der Bewuchszone und ist von der Breite b_{III} des bewuchsfreien Bereiches und von dem Bewuchsparameter B , der die Bewuchsdichte quantifiziert, abhängig :

$$b_{II \max} = b_{III} \cdot 0,25 \cdot B^{0,5} \text{ für } B \leq 16 \text{ (sehr dichter Bewuchs)}$$

$$b_{II,\max} = b_{III} \text{ für } B \geq 16$$

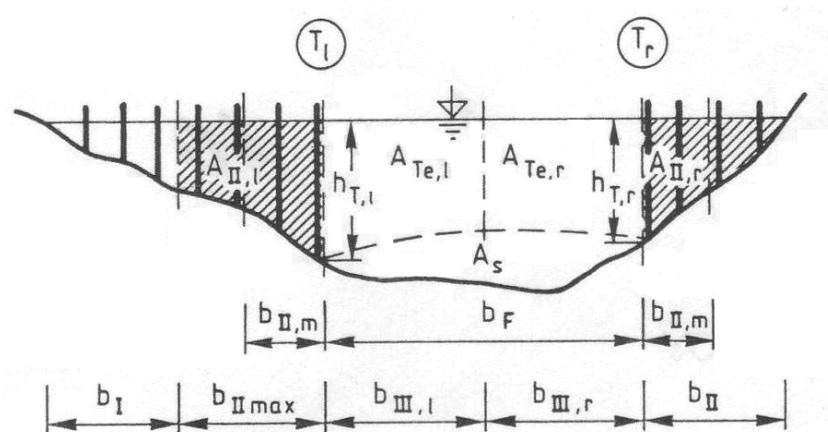


Bild 12 : Querschnittsgliederung bei dem Mertens-Verfahren [DVWK, 1991]

- B ist wie folgt definiert :

$$B = \left(\frac{a_x}{d_p} - 1 \right)^2 \cdot \left(\frac{a_y}{d_p} \right)$$

Der Bewuchsparameter a_x ist dabei der mittlere Abstand in Metern der Bewuchselemente in Fließrichtung, der Bewuchsparameter a_y der mittlere Abstand in Metern quer zur Fließrichtung und der Bewuchsparameter d_p der mittlere Durchmesser in Metern der Bewuchselemente quer zur Fließrichtung. Wie im Bild 13 gezeigt, beschreiben diese drei Parameter das schematische Rechenmodell der unregelmäßigen natürlichen Bewuchsanordnung.

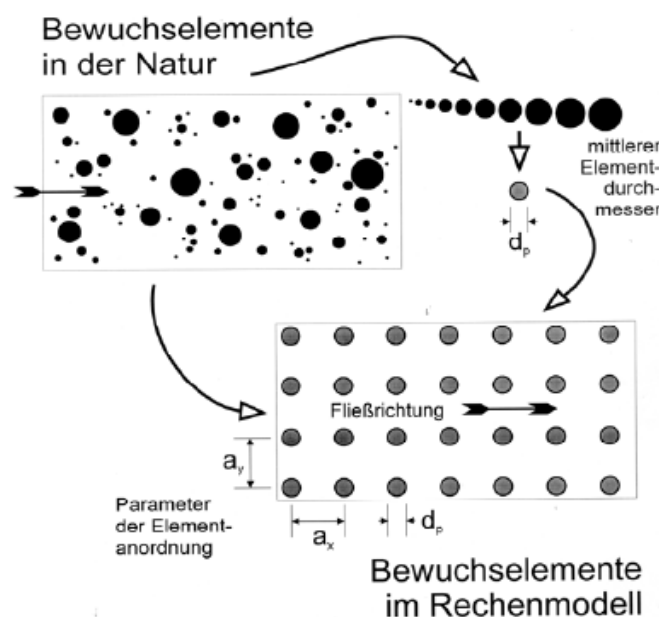


Bild 13 : Übersetzung von natürlichen Bewuchsstrukturen in ein Ersatzmodell mit gemittelten geometrischen Anordnungsparametern (aus Schöberl zit. in [CAYUELA, 2005])

Da die Bewuchselemente eine seitlich begrenzte Störwirkung haben, empfiehlt die DVWK (1991), das Verhältnis a_y/d_p mit dem Wert 10 einzuschränken.

Anhand dieser Definitionen ist zu bemerken, dass B bei zunehmender Dichte des Bewuchses abnimmt.

- $c(B)$ wird wie folgt von der DVWK (1991) definiert :

$$c = 1,2 - 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot B + 0,06 \cdot (10^{-3} \cdot B)^{1,5} \quad \text{für } B \leq 6000$$

$$c = 0 \quad \text{für } B \geq 6000 \quad (\text{sehr undichtes Bewuchs: der Impulsaustausch wird vernachlässigbar})$$

Man bemerkt, dass die Breiten $b_{III,li}$ und $b_{III,re}$ nicht gleich und nicht direkt erfassbar sind, wenn die Anordnung des Bewuchses auf den beiden Böschungen unsymmetrisch ist, was praktisch immer der Fall ist. Die Bestimmung der beiden Trennflächenrauheiten $k_{T,re}$ und $k_{T,li}$

sollen also gleichzeitig behandelt werden und anhand einer iterativen Schleife mit Abschätzung einer der Breiten b_{III} ermittelt werden. Die von der DVWK (1991) empfohlene Iterationsschleife ist im Bild 14 zusammengefasst.

Diese Iterationsschleife hat aber eine Schwäche. Die Bestimmung des neuen Wertes von $b_{III,li}$ wird anhand der Verhältnisse der Widerstandsbeiwerte der Trennflächen ermittelt, die hier nur näherungsweise (Annahme $R_{hy,T,li} \approx b_{III,li}$) berechnet werden können. Um diese Schwäche zu beseitigen, schlägt Indlekofer (2003) einen neuen Ansatz für die Iterationsschleife vor, die direkt das Verhältnis der berechneten Rauheiten benutzt:

$$b_{III,li} = \frac{b_{ges}}{1 + \left(\frac{k_{T,re}}{k_{T,li}} \right)^{1/4}}$$

Die neue Iterationsschleife nach Indlekofer (2003), die übrigens schneller konvergiert, ist im Anhang 3 präsentiert.

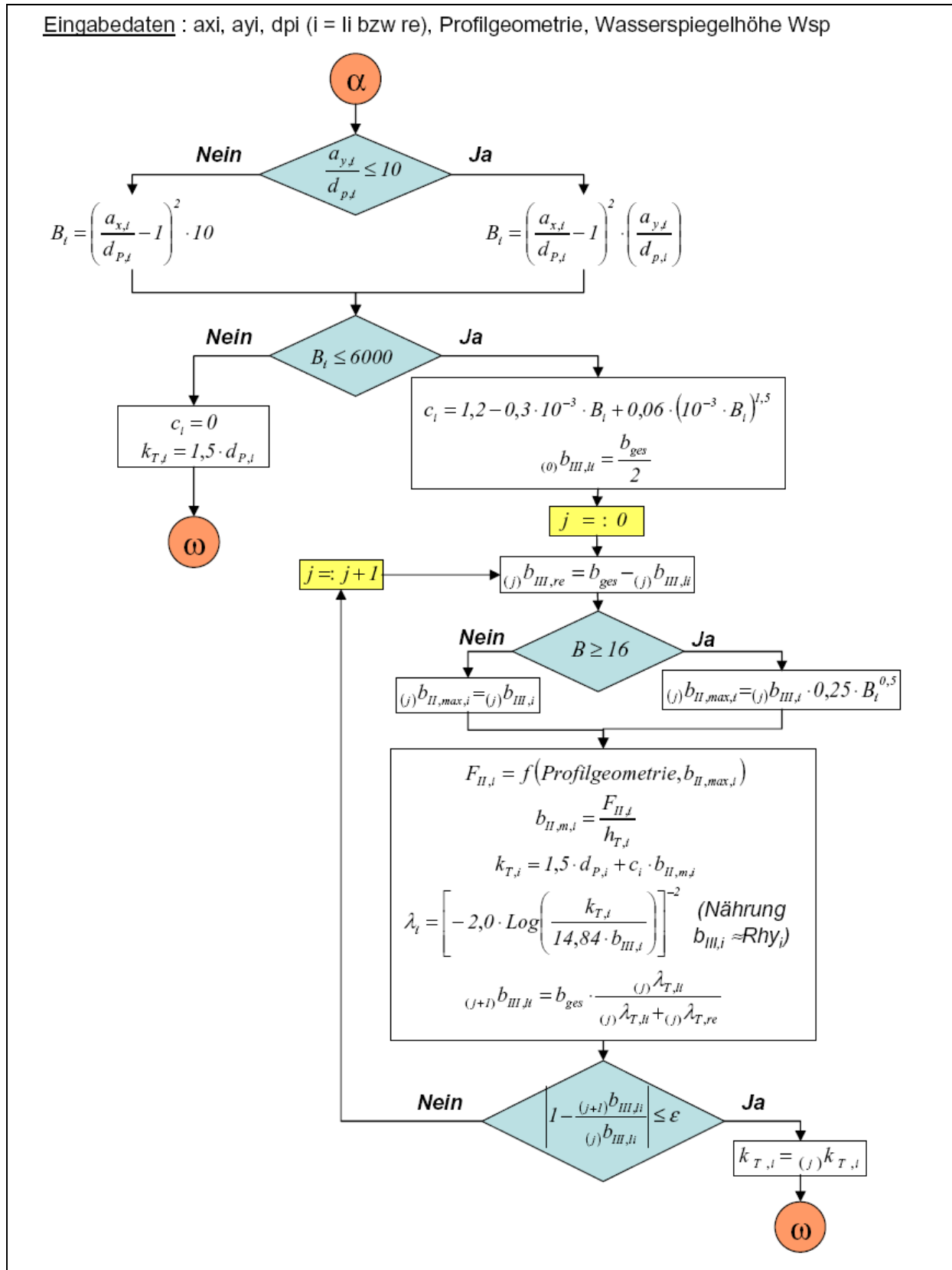


Bild 14 : Struktogramm zur Berechnung der Trennflächenrauheit bei dem Mertens-Verfahren - Empfehlung nach DVWK (1991)

3.2.3.1.2.2. Ergänzung des Mertens-Verfahrens nach SPECHT (2002)

Um den Einfluss der relativen Trennflächenhöhen h_T/t_w und der relativ beeinflussten Breiten b_{III}/h_T in der Quantifizierung der Trennflächenrauheit k_T zu berücksichtigen, hat Specht die, in der Tabelle 4 zusammengestellte, Erweiterung des Mertens-Verfahrens vorgeschlagen.

Trennflächenrauheit k_T :
$k_T = 1,5 \cdot d_p + c \cdot c_{geo} \cdot b_{II,m}$
Geometriebeiwert c_{geo} :
$c_{geo} = f_T \cdot a_1 \cdot \left(\frac{b_{III}}{h_T} \right)^{a_2}$
Koeffizienten a und b des Beiwertes c_{geo} :
$a_1 = \left(0,0074 + 0,85 \cdot \left(\frac{h_t}{t_w} \right)^3 \right)^{-1} \quad \text{und} \quad a_2 = \left(0,76 - 2,93 \cdot \left(\frac{h_t}{t_w} \right) - \frac{0,27}{\left(\frac{h_t}{t_w} \right)} \right)^{-1}$
Transformationsfunktion zur Übertragung auf beliebige Bewuchsanordnungen f_T :
- für die Trennfläche mit dem größeren Widerstand : $f_{T,gro\beta} = 1 + f_{eB} \cdot \left(1 - \frac{(\lambda_T \cdot h_T)_{klein}}{(\lambda_T \cdot h_T)_{gro\beta}} \right)$ - für die Trennfläche mit dem kleineren Widerstand : $f_{T,klein} = 1 - f_{eB} \cdot \left(1 - \frac{(\lambda_T \cdot h_T)_{klein}}{(\lambda_T \cdot h_T)_{gro\beta}} \right) \quad \text{mit} \quad f_{T,klein} \geq 0$
Übertragungsfunktion von symmetrischem auf einseitigen Bewuchs f_{eB} :
$f_{eB} = 1,5 \cdot e^{-0,20 \left(\frac{b_{III}}{h_T} \right)}$

Tabelle 4 : Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse zur Erweiterung des Trennflächenverfahrens nach Mertens [SPECHT, 2002]

Die Voraussetzungen für die Gültigkeit der Erweiterung nach Specht sind folgende:

$$5,2 - 4,0 \cdot \left(\frac{h_T}{t_w} \right) \leq \frac{b_{ges}}{t_w} \leq 13,2 - 6,2 \cdot \left(\frac{h_T}{t_w} \right)$$

Die beim Mertens-Verfahren notwendige Iterationsschleife muss hier angepasst werden. Da f_T von λ_T abhängt, muss eine zusätzliche Schleife im Iterationsvorgang eingeführt werden.

3.2.3.2. Überlagerungsmethoden :

Nach Ermittlung der verschiedenen Rauheiten k_i , die im Abflusswiderstand in dem untersuchten Teilquerschnitt vorkommen, sind die verschiedenen entsprechenden Widerstandsbeiwerte λ_i zu berechnen und mit dem Ansatz nach Einstein-Horton zu überlagern. Der Hauptpunkt dieser Etappe ist die Ermittlung der hydraulischen Radien R_{hy_i} der verschiedenen Teilflächen F_i , die nicht direkt geschätzt werden können. Dafür wurden verschiedene iterative Methoden vorgeschlagen. Hier ist zuerst die Empfehlung nach DWVK (1991) präsentiert. Dann hat Indlekofer (2003 und 2005) zwei weitere Methoden entwickelt, die weniger Berechnungsaufwand als die erste aufweisen.

3.2.3.2.1. Überlagerungsmethode laut Empfehlungen von DWVK (1991)

Hier wird jeder hydraulische Radius R_{hy_i} anhand der Darcy-Weisbach-Gleichung iteriert, bis die Gleichung über die Fläche [15] stimmt. Der Ablauf der Methode ist im Bild 15 dargestellt. Die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m und jeder R_{hy_i} sind hier zu schätzen, was zu einer rechenaufwendigen Methode führt. Ebenso entdeckt man das Wasserspiegelgefälle als einen notwendigen Eingangsparameter dieser Methode.

3.2.3.2.2. Erste Überlagerungsmethode nach INDLEKOFER (2003)

Indlekofer schlägt 2003 eine iterative Überlagerungsmethode vor, die auf der Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung basiert. Um eine Ungenauigkeit bei den Berechnungen zu verhindern, benutzt er den im Abschnitt 3.1.3 eingeführten Korrekturbeiwert κ für die Berechnung der Stricker-Beiwerte $k_{St,i}$ jeder Teilfläche F_i anhand der Rauheit k_i (s. Gleichung [13]). Die Ermittlung der hydraulischen Radien R_{hy_i} basiert auf folgender Gleichung:

$$R_{hy_i} = \left(\frac{k_{St,ges}}{k_{St,i}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot R_{hy_{ges}}$$

Der Ablauf der Methode ist im Bild 16 dargestellt. Hier ist zu bemerken, dass das Wasserspiegelgefälle J nicht in die Berechnung einfließt. Dies ist ein großer Vorteil. Die ermittelten gesamten Flussbeiwerte sollen als endgültiges Ziel erlauben, das Wasserspiegelgefälle als Unbekannte bei der Berechnung der Wasserspiegellage zu beseitigen (s. Gleichung [1]). Meistens ist mit diesem Verfahren nur eine Iterationsschleife notwendig, um das Ergebnis zu bekommen.

3.2.3.2.3. Zweite Überlagerungsmethode nach INDLEKOFER (2005)

Im Jahre 2005 schlägt Indlekofer eine neue Überlagerungsmethode vor, die auch auf der Darcy-Weisbach-Gleichung basiert, aber im Gegensatz zu der Methode nach DVWK (1991) viel weniger Aufwand aufweist. Dafür wird ein neuer Ansatz für die Bestimmung der hydraulischen Radien R_{hy_i} benutzt:

$$R_{hy_i} = \frac{k_i^{1/4}}{\sum_{i=1}^n k_i^{1/4} \cdot u_i} \cdot F_{ges} \text{ (n, Anzahl verschiedener wirkenden Rauheiten } k_i)$$

Diese Gleichung muss auch wie folgt anhand des Korrekturbeiwertes κ korrigiert werden, wenn das Verhältnis k_i/R_{hy_i} größer als 0,12 wird:

$$R_{hy_i} = \frac{(\kappa_i \cdot k_i)^{1/4}}{\sum_{i=1}^n (\kappa_i \cdot k_i)^{1/4} \cdot u_i} \cdot F_{ges}$$

Das Ablaufschema dieser iterativen Methode, die grundsätzlich ähnlich der im Jahre 2003 veröffentlichten Methode ist, wird im Bild 17 dargestellt. Hier ist auch meistens nur eine Schleife bis zur Konvergenz notwendig.

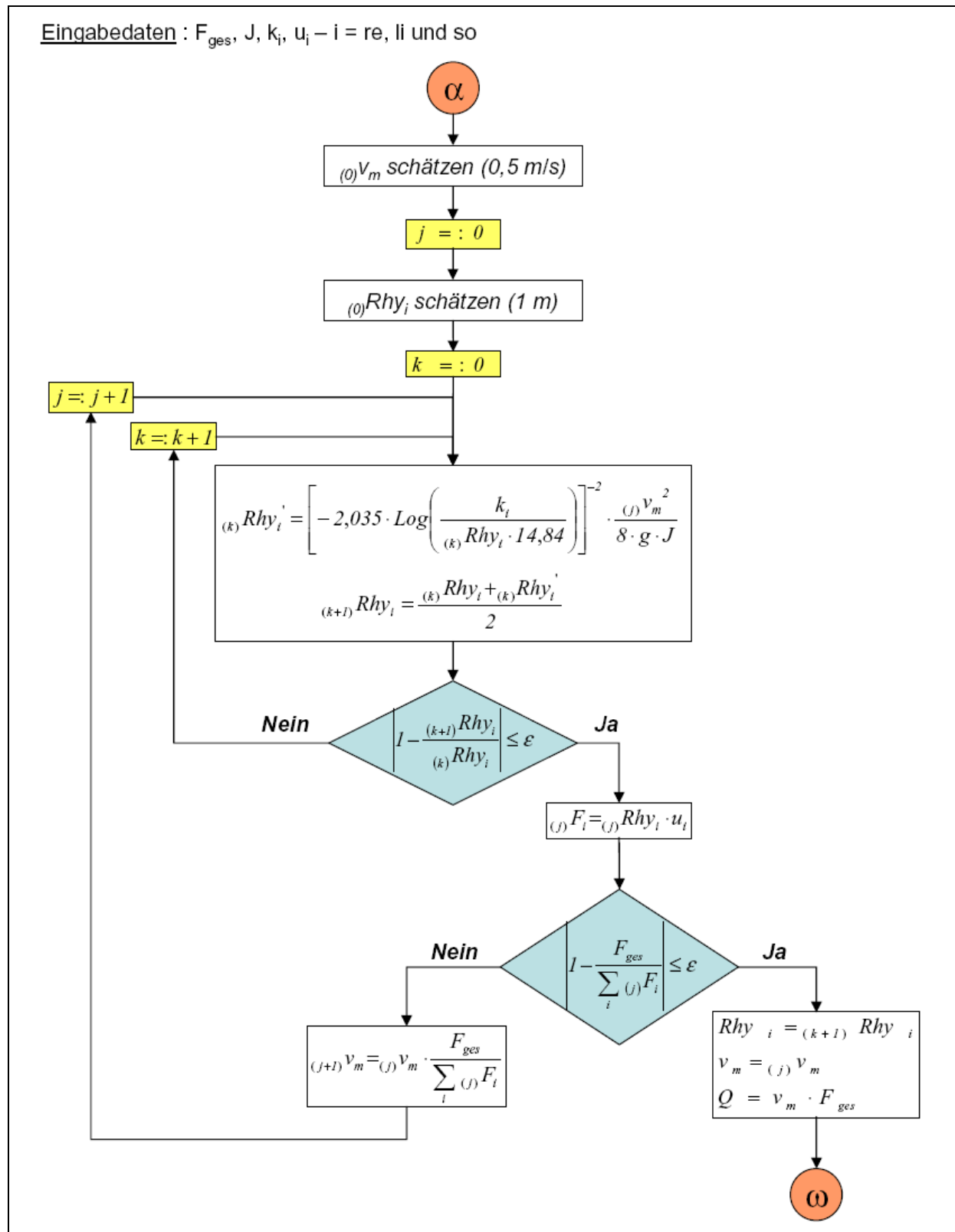


Bild 15 : Struktogramm zur Ermittlung der hydraulischen Radien der Teilflächen nach DVWK (1991)

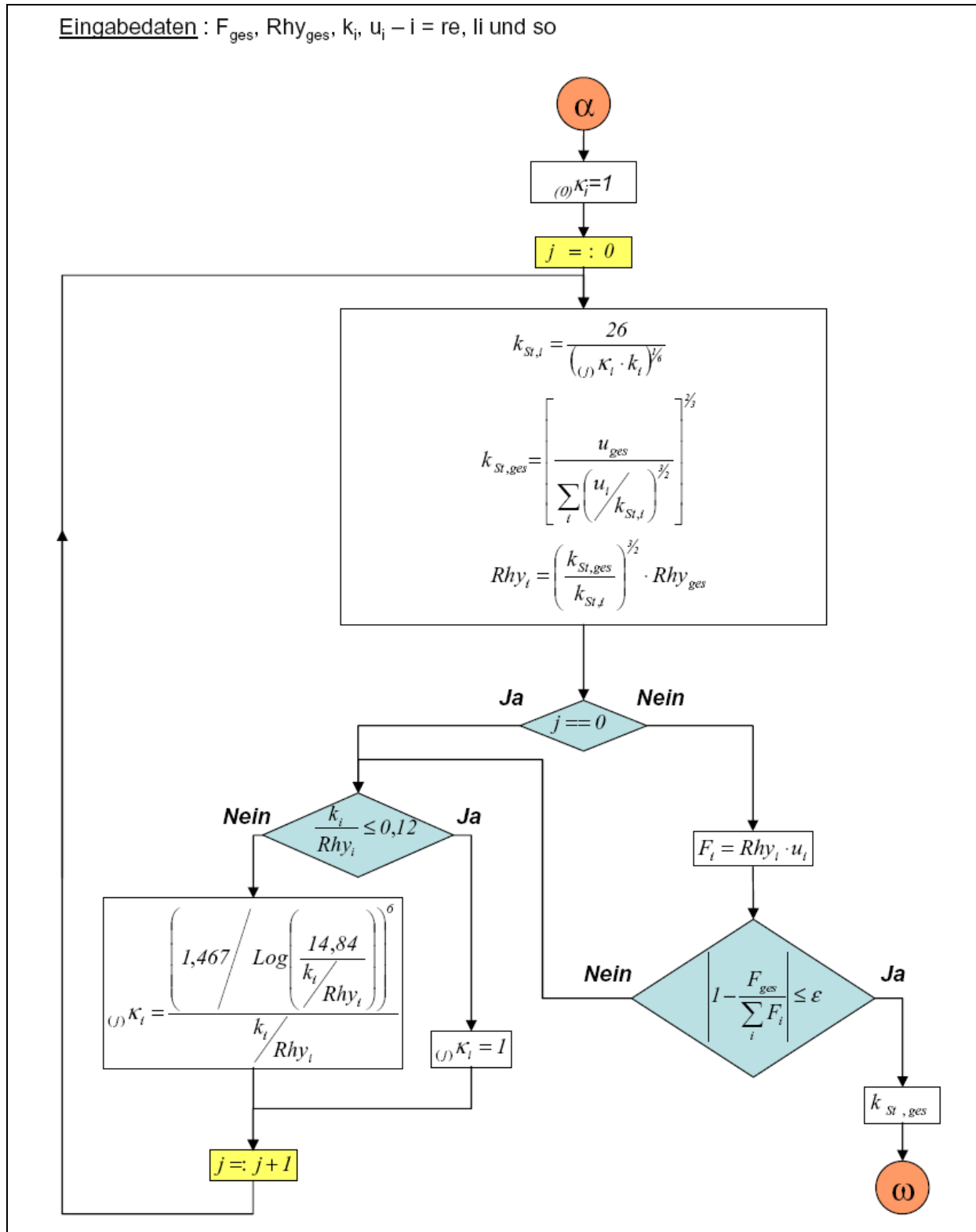


Bild 16 : Struktogramm der Überlagerungsmethode nach Indlekofer (2003)

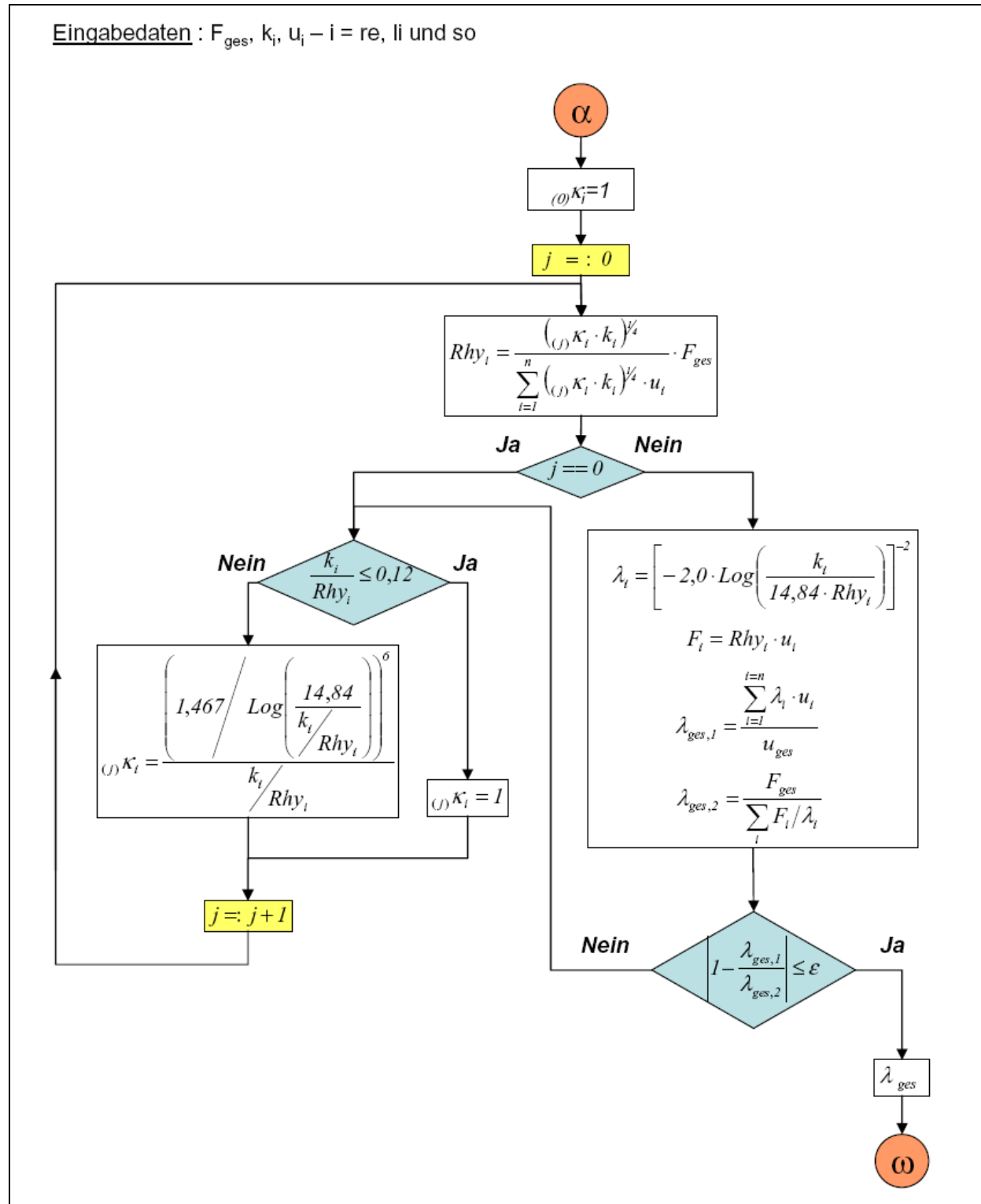


Bild 17 : Struktogramm der Überlagerungsmethode nach Indlekofer (2005)

4. Auswertung der Messergebnisse am Russbach – Machfeldkanal (Niederösterreich)

Die im Abschnitt 3 präsentierten Methoden zur Behandlung der Durchflussberechnung bei naturnahen Querschnitten werden zur Bestimmung der hydraulischen Leistungsfähigkeit des Russbaches am Machfeldkanal (NÖ) umgesetzt.

4.1. Das Machfeldkanal-System

Das Marchfeldkanal-System ist ein vom Bund und Land Niederösterreich finanziertes Bewässerungsprojekt. Es besteht im Wesentlichen aus einem neu geschaffenen Gewässernetz, mit dem Wasser von der Donau in das Marchfeld geleitet wird und hier sowohl der direkten Bewässerung (Feld-Beregnung) als auch der Anreicherung des Grundwassers dient. Hauptaufgabe des Marchfeldkanal-Systems ist die Erhaltung des Grundwasserschatzes, der durch übermäßige Entnahme bereits bedroht war. Damit ist die nachhaltige Sicherung der Wassernutzung für Landwirtschaft, Gewerbe und Industrie sowie Kommunen gewährleistet. [CAYUELA, 2005]

Das rd. 100 km lange Gewässernetz wurde naturnah gestaltet und stellt heute aufgrund seiner landschaftlichen Vielfalt und seinem ökologischen Wert einen wichtigen Lebensraum sowie ein bedeutendes Strukturelement im Marchfeld dar. Das Gewässernetz des Marchfeldkanal-Systems setzt sich aus zwei neu geschaffenen Fließgewässern (Marchfeldkanal und Obersiebenbrunner Kanal) und zwei renaturierten Fließgewässern (Russbach und Stempfelbach) zusammen. Der Bau wurde im Jahre 1992 angefangen und in mehreren Stufen realisiert. Details über den Querschnittsaufbau (Geometrie und Dichtung) des Russbaches im Rahmen des Marchfeldkanalprojektes sind im Anhang 4 gegeben. Bis 1995 wurde das Wasserverteilungsnetz bestehend aus Marchfeldkanal, Russbach, Obersiebenbrunner Kanal und Stempfelbach fertig gestellt. Die dezentrale Grundwasseranreicherung als Instrument zur Erhaltung und Verbesserung des Grundwasserhaushaltes erfolgt über 3 Einzelstandorte, die im Gebiet mit dem größten Grundwasserbedarf liegen. Die Wasserzufuhr von der Donau erfolgt seit Inbetriebnahme des Kraftwerkes Freudenu im freien Gefälle bei Langenzersdorf. Der 18 km lange Marchfeldkanal durchquert auf einer Länge von rd. 7,5 km Wien und mündet bei Deutsch Wagram in den Russbach. Eine weitere Wasserverteilung erfolgt über den Obersiebenbrunner Kanal und den Stempfelbach. Die Streuung des Marchfeldkanal-Systems erfolgt über insgesamt 8 Wehre. Der Durchfluss beträgt je nach Bedarf zwischen 3 und 10 m³/s (Projektmaximum 15,2 m³/s bei Einbeziehung der Hochterrasse in die Bewässerung). Ein Übersichtsplan des Marchfeldkanals befindet sich im Anhang 5).

Im Russbach ist der Hochwasserfall mit $HQ_{100} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ rechnerisch berücksichtigt. Mangelhafte Pflege in einzelnen Abschnitten (vorwiegend fehlender Rückschnitt der Gehölze auf den Böschungen, s. Beispiel im Bild 18) lassen befürchten, dass die geforderte hydraulische Leistungsfähigkeit für HQ_{100} nicht mehr gewährleistet ist.



Bild 18 : Verbuschung am Russbach in 2004

Pflegemaßnahmen waren also am Russbach dringend erforderlich, die neben den Kriterien Zweckmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit auch die Erhaltung der ökologischen Funktionsfähigkeit erfüllten. Demnach ergeben sich aus hydrotechnischer Sicht folgende Fragen:

- Wie groß sind die zu erwartenden Auswirkungen von Pflegemaßnahmen auf die hydraulische Leistungsfähigkeit?
- Was bzw. wie groß ist der Mindestumfang für die Gerinnepflege?

Zur optimalen Lösung der Pflege- und Instandhaltungsaufgabe wurde von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal ein Projekt ins Leben gerufen, das u.a. auch die beiden o.a. Fragenstellungen beinhaltet. Umfangreiche Durchflussmessungen wurden deshalb am Russbach in den vergangenen vier Jahren durchgeführt. Auf ausgewählte Teile davon gründen sich die weiteren Ausführungen der gegenständlichen Arbeit.

4.2. Datengrundlage – Messungen

Für die gegenständliche Untersuchung wurden am Russbach 5 Bereiche mit unterschiedlichen, typischen Bewuchszuständen - die so genannten Referenz-Strecken R1 bis R5 - ausgewählt. Für jeden der Bereiche wurden die, im Bild 19 dargestellten, repräsentativen Querschnitte gewählt :

- 7 Messprofile Q1 bis Q7 – Durchfluss- und Wasserstandmessungen von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal
- 6 Brückenprofile - Durchfluss- und Wasserstandmessungen vom Land NÖ (hydrographischer Dienst)
- 7 Messprofile W1 bis W7 – Wasserstandmessungen von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal

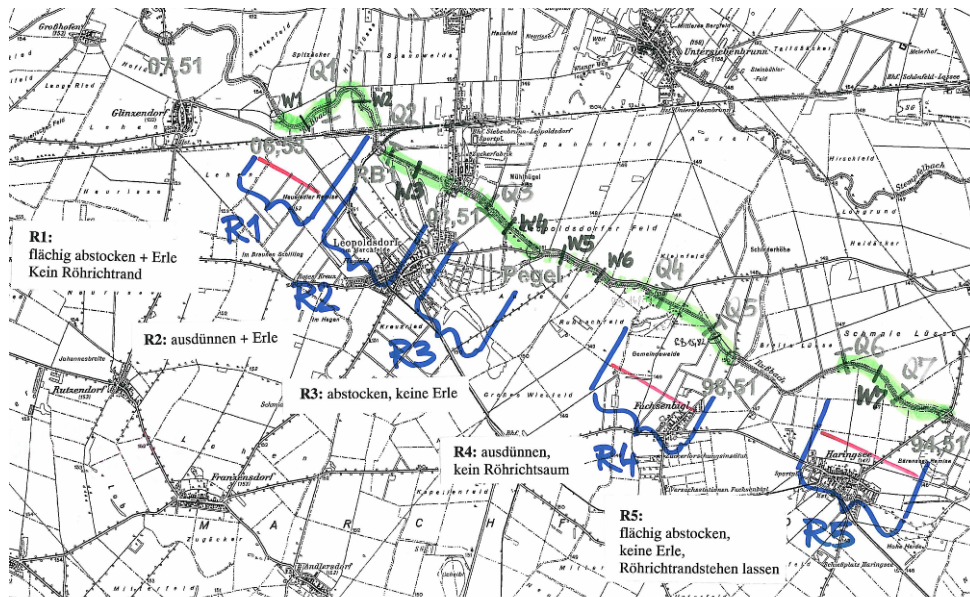


Bild 19 : Definition der Referenz-Strecke und Messprofile am Russbach

Die durchgeführten Bewuchspflegen bestanden aus Abstockung, Auslichtung und Entfernung der einhängenden Äste. Diese erfolgten im :

- Winter 2003/2004 : Pflege der Referenz-Strecke R2 und R3
- Winter 2004/2005 : Pflege der Referenz-Strecke R1 und R4
- Winter 2005-2006 : Pflege der Referenz-Strecke R2 und R5

Die Messungen wurden dann im Herbst und im Frühjahr zwischen 2004 und 2006 vor und nach den Pflegemaßnahmen in den verschiedenen Strecken durchgeführt. Für die Messungen wurde ein nomineller Durchfluss $Q_{\text{nom}} = 4; 6 \text{ und } 10 \text{ m}^3/\text{s}$ im System stationär eingestellt, und für diesen Zustand Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt.



Bild 20 : links : Messungen im Profil Q1 am Russbach in Oktober 2006 – rechts : Beispiel eines FLOMATE-Gerätes

Die Messungen wurden von CAYUELA [2005] ausführlich beschrieben. Im Wesentlichen handelt es sich um eine übliche Erfassung der Fließgeschwindigkeit in einzelnen Messlotrechten verteilt über den behandelten Gerinnequerschnitt mit Hilfe eines Autokranes (mit Meßkorb). Ein magnet-induktiver Geschwindigkeitsmesser „FLOMATE“ (s. Bild 20) wurde verwendet.

Grundsätzlich kann bei Durchflussmessungen davon ausgegangen werden, dass die Abweichung vom tatsächlichen Durchfluss bis zu 15% beträgt. Anhand von Korrelationsrechnungen zwischen den gemessenen Werten verschiedener Mess-Stationen kann der Fehler im gegenständlichen Fall mit 5% begrenzt werden [MFK, 2007]. Die Ergebnisse der Durchfluss- und Wasserstandmessungen befinden sich in Anhang 7 und 8.

Laut den von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal durchgeführten Auswertungen der Messungen [MFK, 2007], zeigt die Veränderung zwischen dem Herbst 2004 (H4) und dem Frühjahr 2005 (F5) im Profil Q1, das zur Referenz-Strecke R1 gehört, a priori die deutlichste Auswirkung der Pflegemaßnahmen (s. Details der Strecke R1 in Anhang 6). Deshalb werden in dieser Diplomarbeit die Empfindlichkeitsuntersuchungen der Durchflussberechnungen in diesem Profil auf die Jahre 2004 und 2005 beschränkt. Die Methode dieser Untersuchung kann dann konform bei den anderen Profilen und anderen Terminen benutzt werden.

4.3. Hydraulische und terrestrische Charakterisierung des Profils Q1 – Nachweis der angewendeten hydraulischen Ansätze



Bild 21 : Profil Q1, Russbach bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ im Frühjahr 2005

Bild 21 zeigt den auf dem Stock geschnitten Böschungsbewuchs im Profilbereich von Q1 im Frühjahr 2005. Die im Jahre 2004 bei Q1 aufgenommene Profilgeometrie ist im Bild 22 dargestellt. Die in diesem Bild angegebenen Trennflächenfußpunkte wurden vor Ort erhoben. Ebenso sind in dem Querprofil jene Wasserspiegelhöhen eingetragen, die der Untersuchung zugrunde gelegt sind. Diese entstammen folgenden Messterminen:

- Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$
- Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$
- Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$
- Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$
- Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

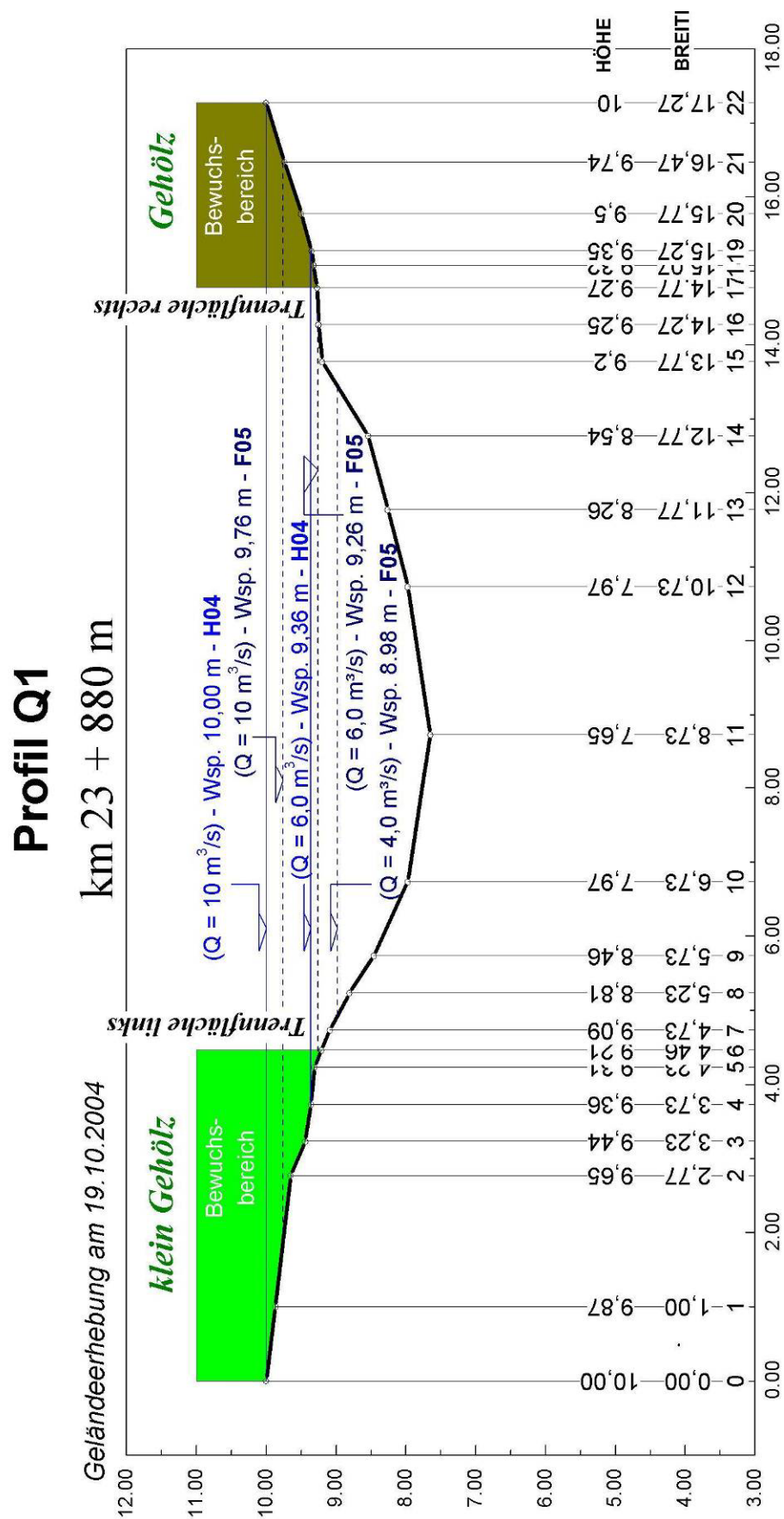


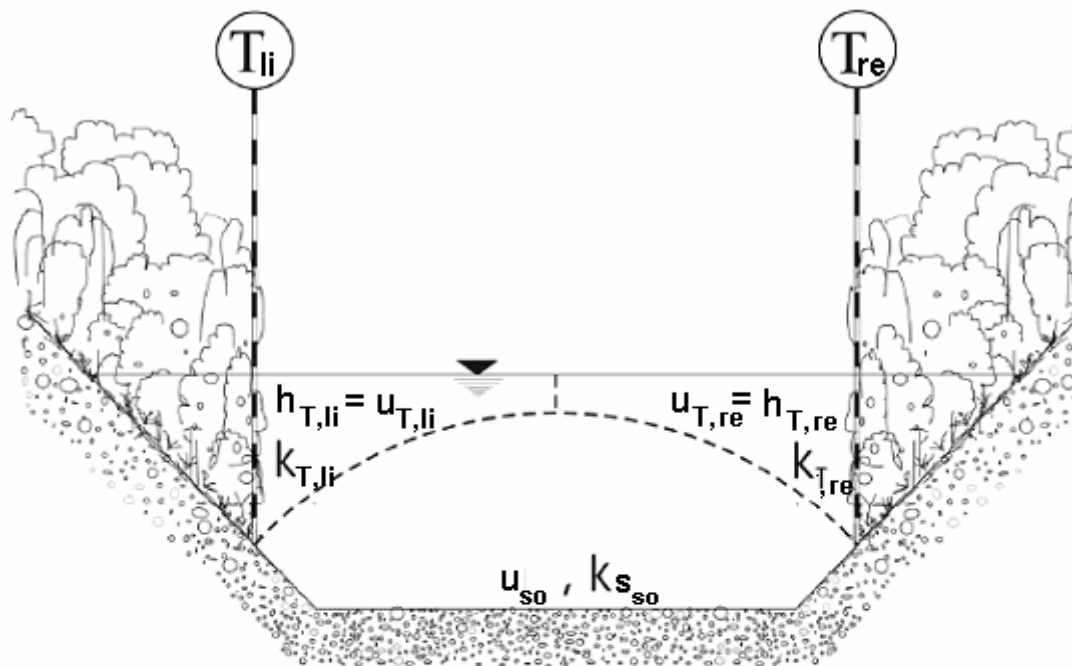
Bild 22 : Profilgeometrie (Datenerhebung aus dem Herbst 2004) im Profil Q1 mit den verschiedenen in den Auswertungen angewendeten Wasserspiegelnhöhen

Anhand dieser beiden Bilder kann die folgende hydraulische Charakterisierung des Querschnitts gemacht werden:

Das Profil Q1 am Russbach:

- o ist ungefähr **trapezförmig** (die Auflandung im Vegetationsbereich haben den ursprünglichen, geplanten, trapezförmigen Querschnitt verändert);
- o kann bei $Q_{\text{nom}} = 4$ und $10 \text{ m}^3/\text{s}$ als „**kompakt**“ angenommen werden. Für $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ muss aufgrund der niedrigen Wassertiefe auf der Ufersehne nach dem Böschungsknick, der sich 13,77m entfernt vom linken Böschungsrand befindet, die Kompaktheit des Querschnitts weiter untersucht werden (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.1 und 4.4.2.1.2.2). Auf jeden Fall gilt das Profil bis zu diesem Böschungsknick als „kompakt“. Daran anschließend muss nachgewiesen werden, ob der Durchfluss zwischen dem Böschungsknick und der rechten Trennfläche zu vernachlässigen ist oder nicht;
- o ist **bewuchsgegliedert** (durch die Vegetation auf den Böschungen);
- o hat einen zu vernachlässigenden Durchfluss im Vegetationsbereich : $Q_{\text{veg}} \approx 0$. Die Messungen haben nämlich gezeigt, dass der Bewuchs nur marginal durchströmt wird;
- o Enthält **3 unterschiedliche Wandungsrauheiten** :
 - Die Rauheit der **Sohle** (quantifiziert durch die äquivalente Sandrauheit der Sohle $k_{s,so}$) : die Rauheit ist gleich über die gesamte Sohle
 - Die Rauheit aufgrund des Bewuchses an der **linken Böschung** (quantifiziert durch die fiktive Rauheit der linken Trennfläche $k_{T,li}$)
 - Die Rauheit aufgrund des Bewuchses an der **rechten Böschung** (quantifiziert durch die fiktive Rauheit der rechten Trennfläche $k_{T,re}$).

Mit dieser Charakterisierung ist erwiesen, dass im Bereich, bei dem der Querschnitt tatsächlich als kompakt angenommen werden kann, das Mertens-Verfahren und die Rauheitsüberlagerung nach Einstein-Horton im Hauptabflussbereich benutzt werden können, um den gesamten Durchfluss im Querschnitt Q1 zu berechnen [s. Abschnitte 3.2.1, 3.2.2.1 und 3.2.3.1.2]. Das Profil Q1 kann daher wie im Bild 23 modelliert werden.



T_{li}	linke Trennfläche
T_{re}	rechte Trennfläche
$u_{T,li}$	benetzte Länge linker Bewuchsrand [m]
$k_{T,li}$	Trennflächenrauheit linker Bewuchsrand [m]
$u_{T,re}$	benetzter Länge rechter Bewuchsrand [m]
$k_{T,re}$	Trennflächenrauheit rechter Bewuchsrand [m]
$u_{s_{so}}$	benetzte Länge der Sohle [m]
$k_{s_{so}}$	Rauheit der Sohle [m]

Bild 23 : Modellierung des Querschnitts Q1 am Russbach

Laut den Gleichungen [16] und [17] :

$$[18] \quad \lambda_{ges} = \frac{\lambda_{so} \cdot u_{so} + \lambda_{T,li} \cdot u_{T,li} + \lambda_{T,re} \cdot u_{T,re}}{u_{ges}} \quad \text{und} \quad F_{ges} = F_{so} + F_{T,li} + F_{T,re}$$

bzw.

$$[19] \quad \frac{u_{ges}}{kSt_{ges}^{3/2}} = \frac{u_{so}}{kSt_{so}^{3/2}} + \frac{u_{T,li}}{kSt_{T,li}^{3/2}} + \frac{u_{T,re}}{kSt_{T,re}^{3/2}}$$

Um kSt_{ges} bzw. λ_{ges} berechnen zu können, muss man :

- die den verschiedenen Wandungsrauheiten zuordenbaren Strickler-Beiwerte [kSt_{so} ; $kSt_{T,li}$; $kSt_{T,re}$] bzw. :
- die absoluten Wandungsrauheiten [$k_{s_{so}}$; $k_{T,li}$; $k_{T,re}$] und deren zugehörigen hydraulischen Radien der Teildurchflussfläche [Rhy_{so} ; $Rhy_{T,li}$; $Rhy_{T,re}$]

ermitteln können.

4.4. Auswertung im Profil Q1

Aus den unterschiedlichen Messungen von Durchfluss und Wasserspiegel im Profil kann nicht unmittelbar auf den gesamten Strickler-Beiwert geschlossen werden, ohne einen Teil der Einflüsse zu vernachlässigen. Doch bei entsprechender Aufbereitung und unter zu Hilfenahme von bewährten Berechnungsmodellen ist nicht nur die Angabe eines plausiblen Strickler-Beiwertes, sondern auch deren, durch die Sensibilität der Einflussgrößen, bedingte Bandbreite möglich.

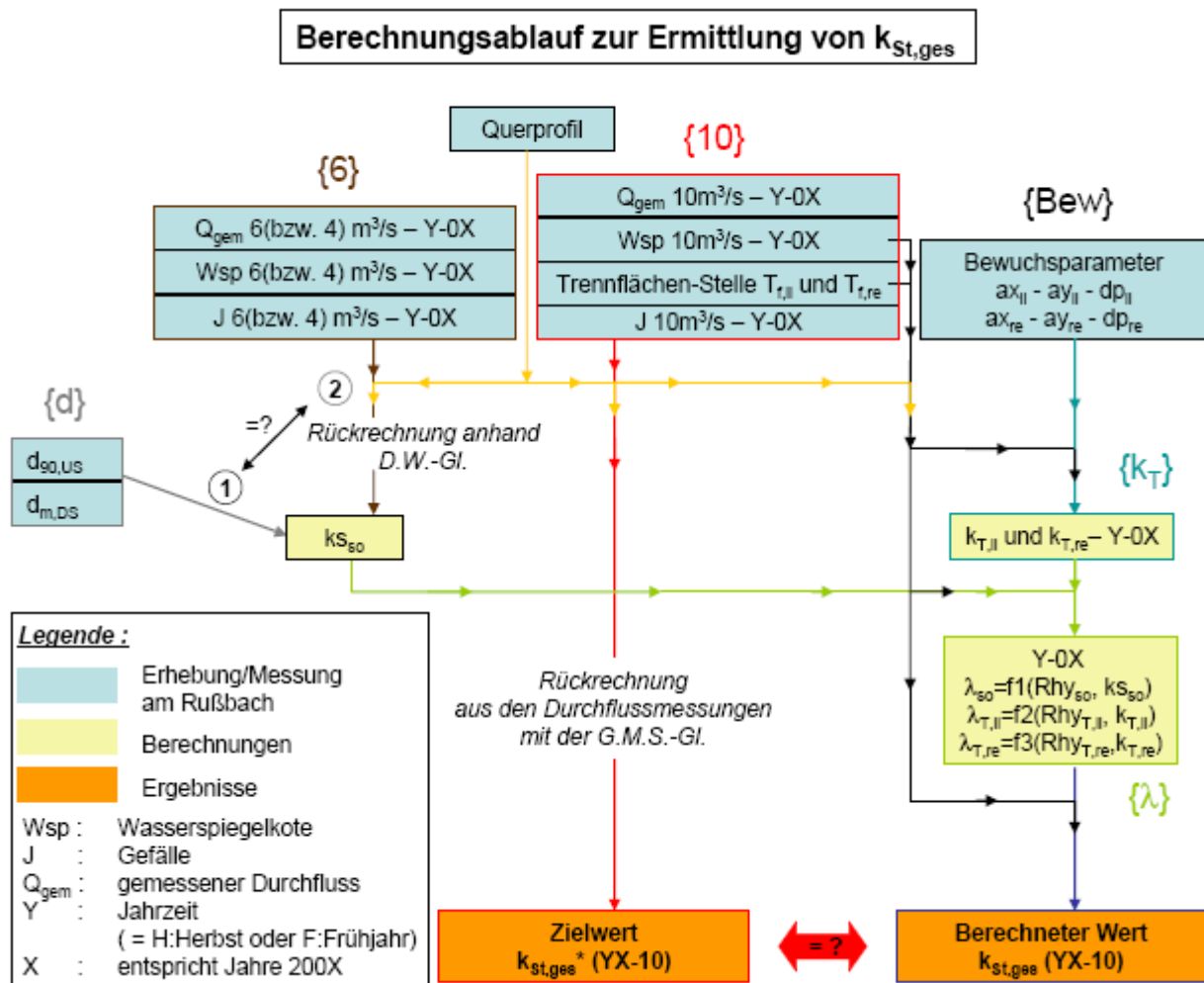


Bild 24 : Darstellung des Berechnungsablaufs bei der Ermittlung von $k_{St,ges}$

Das Ziel dieser Diplomarbeit besteht darin, den Strickler-Beiwert $k_{St,ges}$ des gesamten naturnahen Profils Q1 für Bewuchszustände vor und nach Bewuchspflege durch Berechnung mit hydraulisch-physikalischen Ansätzen (universelles Fließgesetz), ergänzt durch semiempirische Verfahren (z.B. nach Strickler, Mertens) zu ermitteln. Folgende Schritte sind durchzuführen:

- A) Rückrechnung** der Strickler-Beiwerte $k_{St,ges}^*$ aus genau erfassten Durchflüssen der beiden Messungen des Herbstes 2004 und des Frühjahrs 2005;
Jeweils eingestellter sog. „nomineller“ Durchfluss $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$
=> rote Pfeile im Bild 6

B) Berechnung der den Gerinnewandungen zugehörigen **Wandungsrauheiten** (äquivalente Sandrauheiten der Sohle $k_{s_{so}}$ und der linken und rechten Trennfläche $k_{T,li}$ und $k_{T,re}$) mit Hilfe des Berechnungsmodells. Dieses Berechnungsmodell benötigt die terrestrischen („Querprofil“ => gelbe Pfeile im Bild 6) und

- hydraulischen Eingangsgrößen {d} und {6} ohne Bewuchs
 - Verlauf 1: Anwendung der maßgeblichen Korndurchmesser aus tatsächlicher Kornverteilungslinie der Sohle (Block {d})
=> graue Pfeile → $k_{s_{so}}$
 - Verlauf 2: Anwendung des Blocks {6} : Durchfluss, Wasserspiegel und Gefälle bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$
=> braue Pfeile → $k_{s_{so}}$ (rückgerechnet)

Aus dem Vergleich von 1 zu 2 folgt die Festlegung von $k_{s_{so}}$.

- hydraulischen Eingangsgrößen {10} und {Bew} mit Bewuchs
 - * Aus dem Wasserspiegel und den Trennflächenfußpunkten, beides aus Block {10}
=> schwarze Pfeile
 - * In Verbindung mit den Bewuchsparametern [CAYUELA, 2005] aus Block {Bew}
=> hellblaue Pfeile

Erhält man die errechneten fiktiven Rauheiten in den Trennflächen.

→ Block { k_T }

C) Berechnung der Fließwiderstände

- Berechnung von jedem λ_i , der in der Teilfläche F_i wirkt, mit Hilfe:
 - * des Querprofils => gelbe Pfeile
 - * des Wasserspiegels und der Trennfläche aus {10} => schwarze Pfeile
 - * dem Block { k_T } und der Rauheit der Sohle $k_{s_{so}}$ => grüne Pfeile
 → Block { λ_T }
- Berechnung des gesamten Strickler-Beiwertes mittels Rauheitsüberlagerung aus :
 - * { λ_T } => dunkelblaue Pfeile
 - * dem Wasserspiegel und der Trennfläche aus {10} => schwarze Pfeile
 - * dem Querprofil => gelbe Pfeile
 → berechneter $k_{St,ges}$

D) Gegenüberstellung der Ergebnisse aus A) und C)

Im Weiteren werden nach einer Größe und zwischen Klammern folgende Abkürzungen zur Kennzeichnung der Erhebungsdaten und der daraus gewonnenen hydraulischen Parameter verwendet (dies ist im Zusammenhang mit Bild 24 zu betrachten) :

H4 :		Herbst 2004
F5 :		Frühjahr 2005
H5 :		Herbst 2005
4 :		4 m ³ /s
6 :		6 m ³ /s
10 :		10 m ³ /s

So dass, z.B. :

$k_{St}^*(H4-10)$: Rückgerechneter Strickler-Beiwert aus den Daten des Messtermins im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ eingestellt.

Ein Beispiel eines jeden Berechnungsschrittes (Rückrechnung von $k_{St,ges}^*$, Rückrechnung von $k_{St,so}$, Berechnung von $k_{St,ges}$) ist im Anhang 11 gegeben.

4.4.1. Abschätzung des Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}^*$ (initialer⁴ Wert + Vertrauensbereich⁵) durch Rückrechnung mit der Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung

Die Rückrechnung anhand der tatsächlich gemessenen Durchflüsse der gesamten Strickler-Beiwerte des Herbstes 2004 bzw. des Frühjahrs 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ eingestellt $k_{St,ges}^*(H4-10)$ bzw. $k_{St,ges}^*(F5-10)$ liefert Beiwerte, die die gesamten Informationen über die verschiedenen im Profil wirkenden Rauheiten enthalten. Die Bestimmung dieser Größen dient im Weiteren als Vergleichswert für die Berechnungen der Strickler-Beiwerte $k_{St,ges}(H4-10)$ und $k_{St,ges}(F5-10)$ anhand einer Modellierung der verschiedenen Rauheiten (s. Schnitt D wie o.a.).

4.4.1.1. Eingangsparameter zur Bestimmung von $k_{St,ges}^*$

Laut GMS-Gleichung :

[20]	$k_{St,ges}^* = \frac{Q_{gem}}{F_{ges} \cdot Rhy_{ges}^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}}}$
------	--

$Q_{gem} [\text{m}^3/\text{s}] :$	gemessener Durchfluss
$F_{ges} :$	gesamte Fläche des Fluss-Schlauches (ohne Bewuchszone)
$u_{so} [\text{m}] :$	benetzter Umfang der Sohle
$h_{T,li} [\text{m}] :$	linke Trennflächenhöhe
$h_{T,re} [\text{m}] :$	rechte Trennflächenhöhe
$u_{ges} = u_{so} + h_{T,li} + h_{T,re} [\text{m}] :$	gesamter benetzter Umfang des Schlauches (Sohle+Trennflächenhöhen)
$Rhy_{ges} = \frac{F_{ges}}{u_{ges}} [\text{m}] :$	hydraulischer Radius des Fluss-Schlauches
$J [-] :$	Gefälle

⁴ Mit „initial“ wird der direkt (in der Natur) gemessene oder bestimmte Wert einer Kenngröße gemeint.

⁵ Unter „Vertrauensbereich“ wird hier Bandbreite verstanden

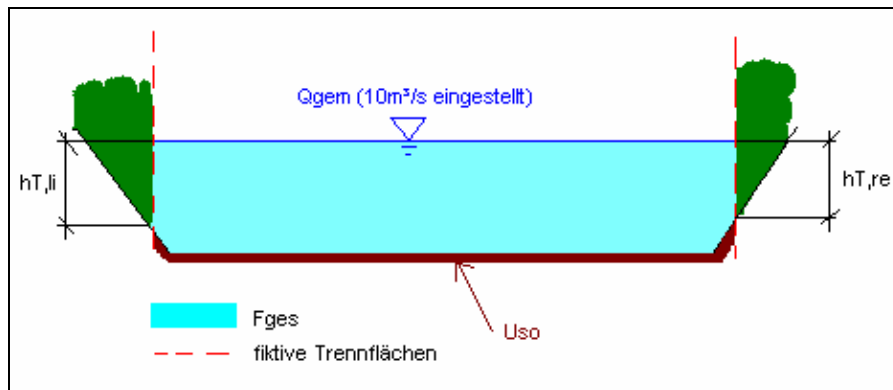


Bild 25 : Schematische Darstellung eines typischen Profils bei 10m³/s eingestellt

[21]	$k_{St,ges}^* = f(Q_{gem}, J, T_f, W_{sp}, Pr)$
------	---

wobei Q_{gem} , J , der Trennflächenfußpunkt T_f , W_{sp} und die Profilgeometrie Pr unabhängig gemessene Parameter sind.

4.4.1.2. Rückrechnung aus den Messungen des Herbstes 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

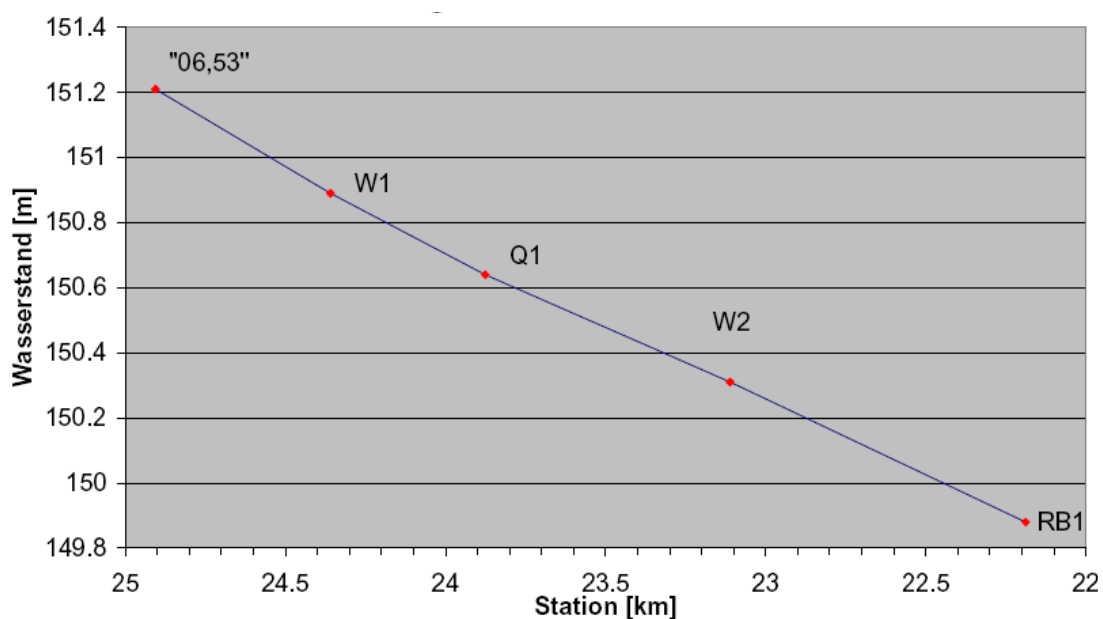
4.4.1.2.1. Bestimmung der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*(H4-10)$

Die Bestimmung besteht darin, den initialen Wert und den Vertrauensbereich von jedem Eingangsparameter festzulegen.

4.4.1.2.1.1. Initiale Werte der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*(H4-10)$

Es wurde im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ die in der Tabelle 5 zusammengefassten Größen gemessen.

Parameter :	Kommentar :	
$Q_{\text{gem}}(\text{H4-10})= 9,42 \text{ m}^3/\text{s}$	Auswertung aus Messungen der Fließgeschwindigkeiten (s. Durchflussmessungstabelle der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal im Anhang 8)	
$J(\text{H4-10})= 0,489 \text{ ‰}$	Es wird laut dem Zwischenbericht der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal [MFK, 2007] angenommen, dass das Gefälle für das Profil Q1 als mittleres Gefälle der Referenz-Strecke R1, d.h., zw. den beiden extremen Messstellen der Strecke „06.53“ und „RB1“ berechnet werden darf.(s. Bild 26)	
$W_{\text{sp}}(\text{H4-10})$ = $W(\text{H4-10}) - \text{V.E.}$ = 10 m	V.E. : Vergleichsebene = 140,54 m. Die Wasserstandmessungen (W) wurden von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal und dem hydraulischen Dienst des Landes NÖ durchgeführt. (s. Wasserstandmessungstabelle im Anhang 7, Bild 22 und Bild 26.)	
$T_{\text{fi}} = 4,46\text{m}$	Fußpunkt der Trennfläche links	Werte von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal angegeben(aus ursprünglichen Berechnungen). Durch Beobachtungen vor Ort während der Messungen festgelegt.
$T_{\text{re}} = 14,77 \text{ m}$	Fußpunkt der Trennfläche rechts	
Profilgeometrie laut Bild 22		im Herbst 2004 gemessen

Tabelle 5 : Bestimmung der initialen Werte der Eingangsparameter von $k_{\text{St,ges}}^*(\text{H4-10})$ Bild 26 : gemessener Wasserstand in der Referenz-Strecke R1 zw. den Messstationen „06,53“ und „RB1“ bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ eingestellt im Herbst 2004

4.4.1.2.1.2. Vertrauensbereich der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*$ (H4-10)

- Durchfluss :

Laut der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal (s. Abschnitt 4.2) liefert die angewendete Ermittlungsmethode von Q_{gem} :

[22]	$\left \frac{\Delta Q_{gem}}{Q_{gem,init}} \right = 5\%$
------	--

$|\Delta Q_{gem}|$: Absolute Fehlergröße für Q_{gem} – Der Vertrauensbereich von Q_{gem} ist daher $[Q_{gem,init} - |\Delta Q_{gem}| ; Q_{gem,init} + |\Delta Q_{gem}|]$ – [HOENTZSCH, 2006]

$|\Delta Q_{gem}/Q_{gem,init}|$: Relative Fehlergröße für Q_{gem} – $Q_{gem} = Q_{gem,init} \pm |\Delta Q_{gem}/Q_{gem,init}|$

- Gefälle :

$$J = \frac{W(RB1) - W(06.53)}{St(06.53) - St(RB1)} = \frac{W_{Diff}}{St_{Diff}}$$

W [m] : gemessener Wasserstand

$W(RB1)$ [m] : Wasserstand bei der Messstation „RB1“ gemessen

$W(06.53)$ [m] : Wasserstand bei der Messstation „06.53“ gemessen

$St(06.53)$ [m] : Station am Bach bei „06.53“ ($St = 0m$ in Einmündung des Baches)

$St(RB1)$ [m] : Station am Bach bei „RB1“

W_{Diff} [m] : Wasserstands Differenz zw. den Messstationen RB1 und „06.53“

St_{Diff} [m] : Distanz zw. den Messstationen RB1 und „06.53“

So dass, allgemein geschrieben :

$$\left| \frac{\Delta J}{J_{init}} \right| = \left| \frac{\Delta W_{Diff}}{W_{Diff,init}} \right| + \left| \frac{\Delta St_{Diff}}{St_{Diff,init}} \right|$$

$$St_{Diff,init} = 3.3 \text{ km}$$

Die Wasserstandmessungen des Herbstes 2004 bei $Q_{nom}=10m^3/s$ haben geliefert :

$$W_{Diff,init} (H4-10) = 1.33 \text{ m}$$

$$|\Delta W_{Diff}| = 2 \cdot |\Delta W|$$

Es wird angenommen, dass : $|\Delta W| = 1cm$ (nach mündlicher Mitteilung der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal).

Die Unsicherheit der Wasserspiegelmessung ist nur auf die Ungenauigkeit des Messgerätes zurückzuführen. Es wird nämlich von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal nachgewiesen, dass die im Russbach entstehenden Wellen zu keinen größeren Fehlern führen.

Es wird angenommen dass: $|\Delta St_{Diff}| = 10 \text{ cm} \rightarrow \left| \frac{\Delta St_{Diff}}{St_{Diff,init}} \right|$ ist vernachlässigbar. So dass :

[23]	$\left \frac{\Delta J(H4-10)}{J_{init}(H4-10)} \right \approx \left \frac{\Delta W_{Diff}}{W_{Diff}(H4-10)} \right = 1,5\%$
------	---

- Wasserspiegelhöhe :

[24]	$ \Delta W_{sp} = \Delta W = 1cm$
------	--------------------------------------

- Trennflächenfußpunkte :

Die Trennflächenfußpunkte haben folgende Vertrauensbereiche im Profil Q1 :

[25]	$3,71m \leq T_{f_{li}} \leq 4,46m$ $13,77 \leq T_{f_{re}} \leq 14,77m$
------	---

Die Grenzen der Vertrauensbereiche wurden anhand der Verteilung des spezifischen Durchflusses q [(m³/s)/m] über den Querschnitt Q1 ermittelt (s. Anhang 9 die Ergebnisse der Flügelmessungen im Profil Q1 im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005 und ihre Bewertung zur Bestimmung des gesamten Durchflusses). Grundsätzlich liegt die Position der Trennfläche dort, wo eine deutliche Abminderung des spezifischen Durchflusses beobachtet werden kann. Die grüne gestrichelte Linie im Bild 27 zeigt diesen möglichen Trennflächenfußpunkt. Der initiale Trennflächenfußpunkt wurde während der Messung augenscheinlich mit dem Bewuchsrand aus der Wasseroberfläche festgelegt. Die Spanne aus beiden Punkten kann in diesem Fall als Vertrauensbereich angesehen werden.

Außerdem zeigt das Profil deutlich, dass durch die Bewuchsentwicklung Auflandungen in den oberen Böschungsbereichen entstanden sind. Diese liegen links bzw. rechts von dem jeweiligen Knickpunkt ($y = 4,23$ bzw. $13,77$ m, s. Bild 9). Die Knickpunkte können als „Langzeit“-Trennflächenfußpunkte betrachtet werden. Die Variierung des Fußpunktes in seinem Vertrauensbereich ist im Vergleich zu seiner initialen Stelle nur nach links für die beiden Trennflächen möglich.

Der Vergleich der spezifischen Durchflüsse im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005 zeigt zusätzlich, dass – trotz der Pflegemaßnahmen zwischen diesen beiden Terminen – kein wesentlicher Unterschied zwischen den Trennflächenfußpunkten im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005 gemacht werden kann. Daher darf man, wie es von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal angenommen wurde, innerhalb des Zeitraumes unserer Untersuchungen die Trennflächenfußpunkte links und rechts unabhängig von der Zeit und somit fix für das betrachtete Profil berücksichtigen.

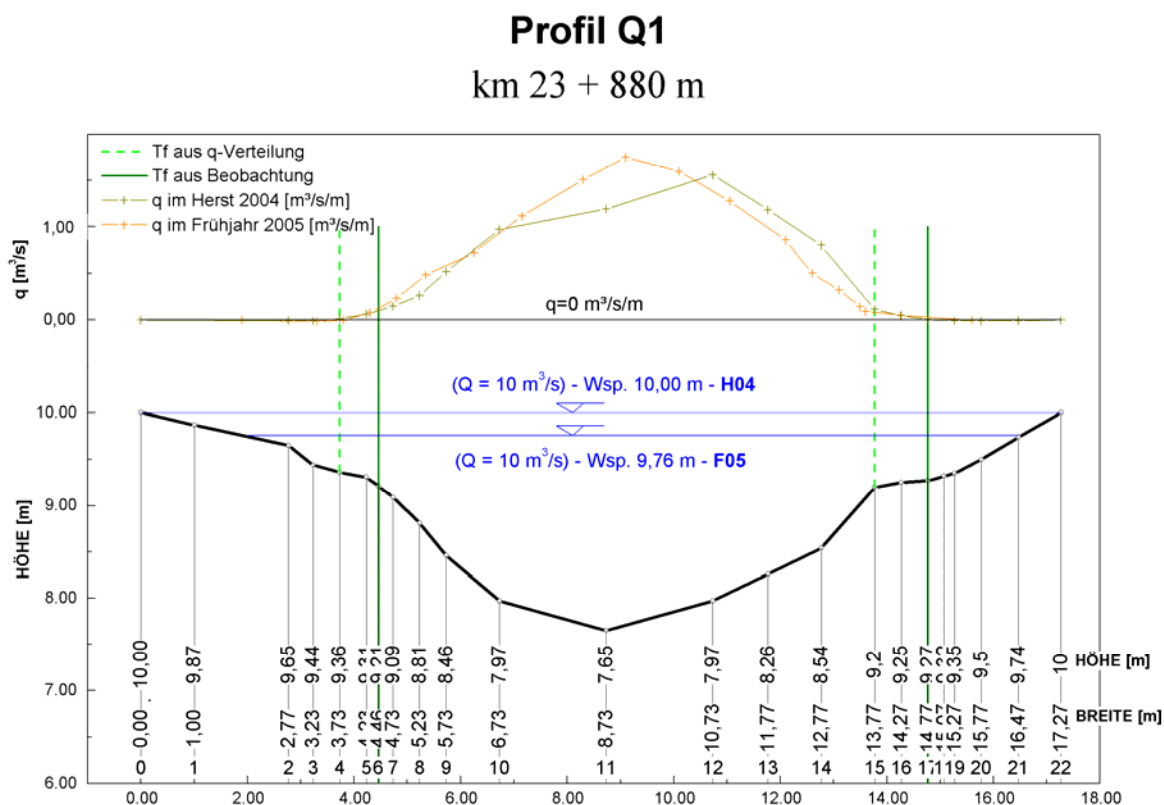


Bild 27 : gemessenes Querprofil und Verteilung der gemessenen spezifischen Durchflüsse q im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005

- Profilgeometrie :

Da der Sedimenttransport im Russbach kaum eine Wirkung auf die Sohleverformung hat, wird die Profilgeometrie fix für jeden Termin angenommen. Es wird immer die im Herbst 2004 gemessene Profilgeometrie berücksichtigt. Um die Unsicherheit dieser Annahme zu quantifizieren, könnten die Berechnungen mit der während der weiteren Terminmessungen gemessenen Profilgeometrie des Profils durchgeführt werden. Diese Unsicherheitsbetrachtung wurde hier nicht weiter untersucht, weil die Erhaltung der exakten Profilachse bei der Messung praktisch nicht möglich ist.

4.4.1.2.1.3. Zusammenfassung - Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*(H4-10)$:

Parameter	Initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich
$Q_{gem}(H4-10)$ [m³/s]	9.42	+/- 5%	[8.95 – 9.89]
$J(H4-10)$ [‰]	0.489	+/- 1.5%	[0.482 – 0.496]
$Wsp(H4-10)$ [m]	10	+/- 1 cm	[9.99 – 10.01]
Tf_{li} [m Entfernung von linker Böschung]	4.46	- 0.73 m	[3.73 – 4.46]
Tf_{re} [m Entfernung von linker Böschung]	14.77	- 1 m	[13.77 – 14.77]
Profilgeometrie	laut Bild 2.1.-1	-	-

Tabelle 6 : Bestimmung der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*$ im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10$ m³/s

4.4.1.2.2. Rückrechnung des gesamten Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}^*(H4-10)$

Im folgenden wird der initiale Wert und die Fehlerschranke des gesamten Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}^*(H4-10)$ bestimmt.

4.4.1.2.2.1. Initialer Wert von $k_{St,ges}^*(H4-10)$

Mit den initialen Profilwerten :

$$F_{ges,init}(H4-10) = 17,43 \text{ m}^2$$

$$Rhy_{ges,init}(H4-10) = 1,396 \text{ m}$$

$$u_{ges,init}(H4-10) = 12,486 \text{ m}$$

und mit der Gleichung [20] wird :

[26]	$k_{St,ges,init}^*(H4-10) = 19,56 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
------	---

wobei :

$k_{St,ges,init}^*(H4-10)$: aus den gemessenen initialen Werten der Parameter ermittelter Wert der Größe $k_{St,ges}^*(H4-10)$

$F_{ges,init}(H4-10)$: initialer Wert der Querschnittsfläche des Hauptabflussbereiches im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

$u_{ges,init}(H4-10)$: initialer Wert des benetzten Umfang des gesamten Hauptabflussbereich im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

$Rhy_{ges,init}(H4-10)$: initialer Wert des hydraulischen Radius des gesamten Hauptabflussbereich im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.1.2.2.2. Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*(H4-10)$ (durch Variierung der Parameter)

Ein Parameter wurde jeweils in seinem Vertrauensbereich variiert, während die anderen mit dem initialen Wert fix gehalten wurden. Das Verhältnis von $k_{St,ges}^*(H4-10)$ in Abhängigkeit von jedem Parameter und sein Vertrauensbereich wurden mit dieser Methode (Sensitivitätsanalyse) untersucht.

- Fehler für $k_{St,ges}^*(H4-10)$ aufgrund des gemessenen Durchflusses Q_{gem}

$k_{St,ges}^*$ hat eine explizite lineare Abhängigkeit von Q_{gem} :

$$k_{St,ges}^* = \alpha \cdot Q_{gem} \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{1}{J_{init}^{1/2} \cdot F_{ges,init} \cdot Rhy_{ges,init}^{2/3}}$$

(Für die Parameter J_{init} , $F_{ges,init}$ und $Rhy_{ges,init}$ mit den Daten aus dem Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen hat man $\alpha(H4-10) = 2,08 \text{ m}^{8/3}$.)

So dass :

[27]	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^*(H4-10)}{k_{St,ges,init}^*(H4-10)} \right _{Q_{gem}} = \left \frac{\Delta Q_{gem}}{Q_{gem,init}} \right = 5\%$
------	---

- Fehler für $k_{St,ges}^*(H4-10)$ aufgrund des Gefälles J

$k_{St,ges}^*$ hat eine explizite Abhängigkeit von J :

$$k_{St,ges}^* = \beta \cdot J^{-1/2} \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{Q_{gem,init}}{F_{ges,init} \cdot Rhy_{ges,init}^{2/3}}$$

(Für die Parameter $Q_{gem,init}$, $F_{ges,init}$ und $Rhy_{ges,init}$ mit den Daten aus dem Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen hat man $\beta(H4-10) = 0,43 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$.)

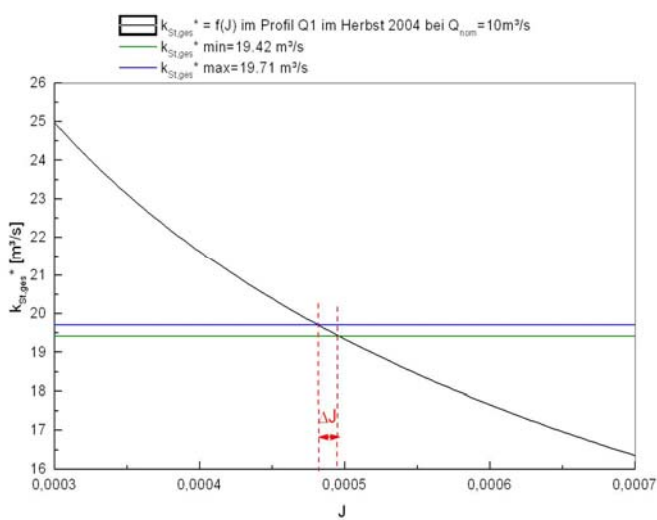


Bild 28 : (links) $k_{St,ges}^*(H4-10)$ in Abhängigkeit von dem Gefälle (J) im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

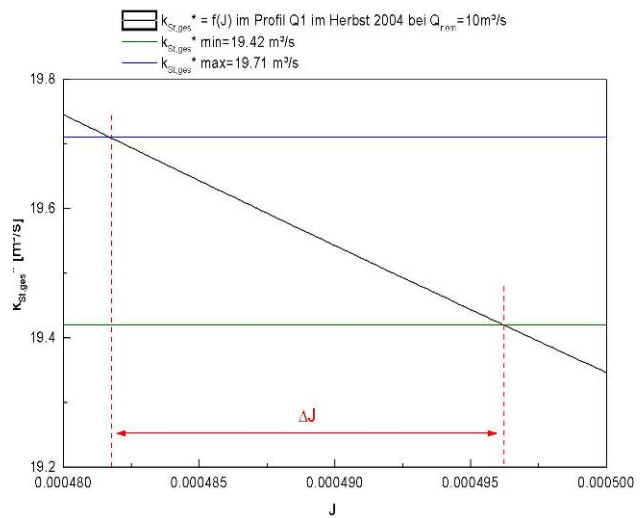


Bild 29 : (rechts) Vertrauensbereich im Detail (Vergrößerung)

Laut Bild 28 und Bild 29 kann im Vertrauensbereich von $J(H4-10)$ die Funktion $k_{St,ges}^*(H4-10)=f(J)$ linear angenommen werden, so dass :

[28]	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^*(H4-10)}{k_{St,ges,init}^*(H4-10)} \right _J = \frac{1}{2} \cdot \left \frac{\Delta J(H4-10)}{J_{init}(H4-10)} \right = 0,8\%$
------	---

- Fehler für $k_{St,ges}^*(H4-10)$ aufgrund des Wasserspiegels Wsp

Es gibt keine einfache, explizite Funktion, die das Verhältnis von $k_{St,ges}^*$ in Abhängigkeit von der Wasserspiegelhöhe darstellt. Der Beiwert $k_{St,ges}^*(H4-10)$ wird also für verschiedene Werte von Wsp(H4-10) in seinem Vertrauensbereich rückgerechnet und alle anderen Parameter werden mit dem initialen Wert fix gehalten. Die Funktion $k_{St,ges}^*(H4-10) = f(Wsp)$ ist im Bild 30 dargestellt.

Die Rückrechnungen haben geliefert:

Wsp [m]	Wsp _{init} (H4-10) -1cm	Wsp _{init} (H4-10)	Wsp _{init} (H4-10) +1cm
	9,99	10,00	10,01
$k_{St,ges}^*(H4-10)$ [m ^{1/3} /s]	19,74	19,56	19,39

Tabelle 7 : $k_{St,ges}^*(H4-10)$ im Vertrauensbereich von dem Wasserspiegel

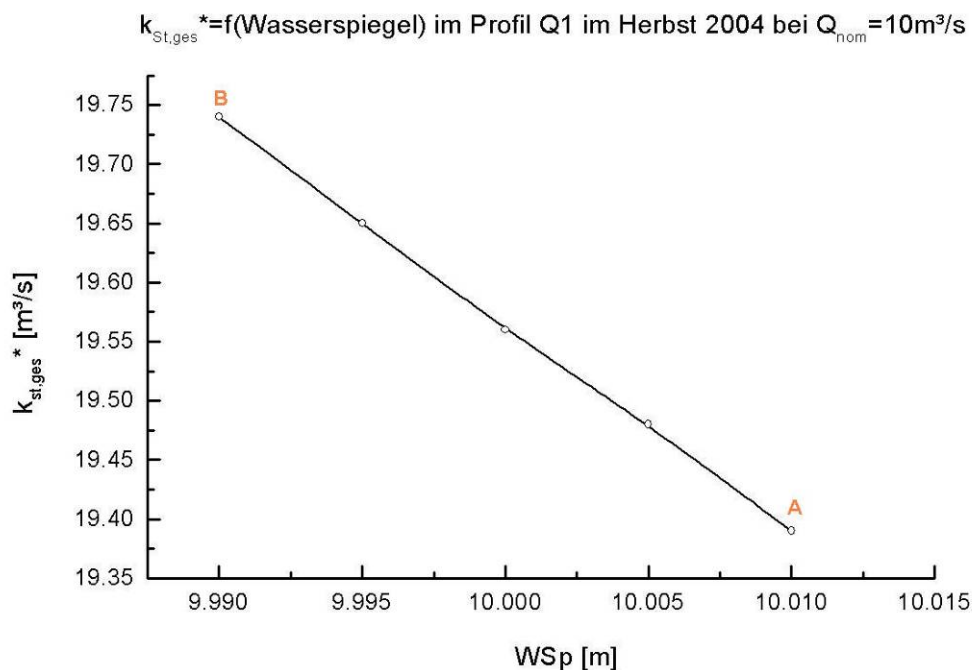


Bild 30 : $k_{St,ges}^*(H4-10)$ im Vertrauensbereich von Wsp(H4-10)

Im Vertrauensbereich von Wsp(H4-10) hat $k_{St,ges}^*(H4-10)$ ein lineares Verhalten, so dass man schreiben darf (mit „A“ und „B“ aus dem Bild 30):

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^*(H4-10)}{k_{St,ges,init}^*(H4-10)} \right|_{Wsp} = \left| \frac{k_{St,ges}^*(B) - k_{St,ges}^*(A)}{2 \cdot k_{St,ges,init}^*(H4-10)} \right|$$

[29]	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^*(H4-10)}{k_{St,ges,init}^*(H4-10)} \right _{Wsp} = 0,9\%$
------	--

- Fehler für $k_{St,ges}^*(H4-10)$ aufgrund der Trennflächenfußpunkte Tf_{li} und Tf_{re}

Ähnlich wie bei der Abhängigkeit von der Wasserspiegelhöhe lässt sich auch in diesem Fall kein explizites Verhältnis angeben. Daher wurden an linker und rechter Böschung jeweils 3 Positionen für die Trennflächenfußpunkte angenommen und über diesen Vertrauensbereich $k_{St,ges}^*(H4-10)$ rückgerechnet :

Tf_{re} nach innen verschoben von [m] :	0	0.5	1
$k_{St,ges}^*(H4-10)$ [$m^{1/3}/s$]	19,56	19,75	20,00

Tf_{li} nach außen verschoben von [m] :	0	0.23	0.73
$k_{St,ges}^*(H4-10)$ [$m^{1/3}/s$]	19,56	19,40	19,25

Tabelle 8 : $k_{St,ges}^*(H4-10)$ im Vertrauensbereich der Trennflächenfußpunkte

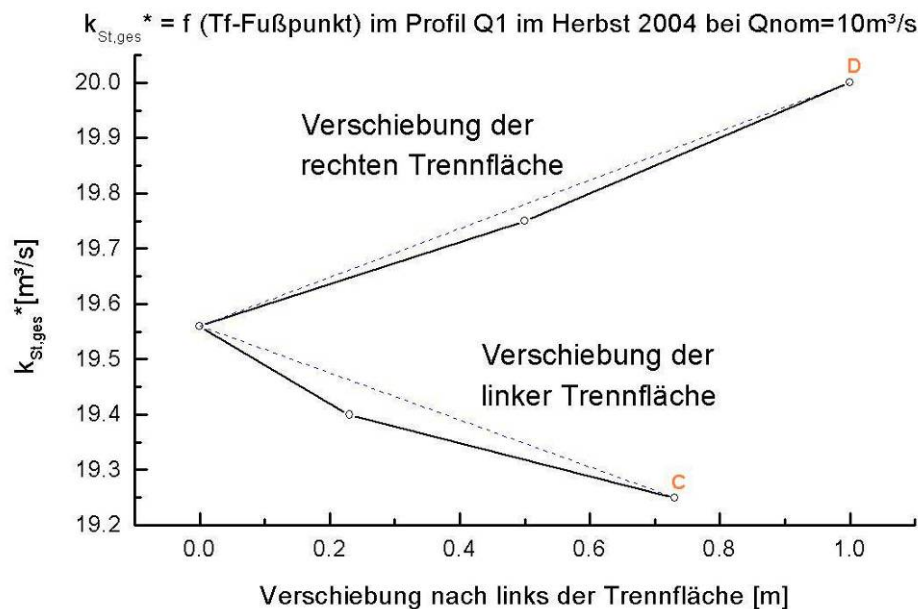


Bild 31 : $k_{St,ges}^*(H4-10)$ in Vertrauensbereich der beiden Trennflächenfußpunkte

Laut Bild 31 kann nicht angenommen werden, dass $k_{St,ges}^*$ ein lineares Verhalten in Abhängigkeit von jeder Verschiebung hat, so dass streng genommen keine Unsicherheit von $k_{St,ges}^*(H4-10)$ aufgrund der Trennflächenfußpunkte in % geschätzt werden darf. Die Abweichung von der Linearität liegt maximal bei $0,05 m^{1/3}/s$, so dass die Fehlergröße in % dennoch berechnet werden darf. Außerdem ist $k_{St,ges}^*(H4-10)$ minimal mit Tf_{li} um 0.73 m nach außen verschoben und Tf_{re} an dem initialen Fußpunkt (Punkt C im Bild 31) und maximal mit Tf_{li} an dem initialen Fußpunkt und Tf_{re} um 1 m nach außen verschoben (Punkt D im Bild 31). Somit ist, wenn wir mit „Tf“ die resultierende Mitwirkung der beiden Trennflächen Tf_{li} und Tf_{re} bezeichnen:

[30]	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^*(H4-10)}{k_{St,ges,init}^*(H4-10)} \right _{Tf} \approx \left \frac{k_{St,ges}^*(D) - k_{St,ges}^*(C)}{2 * k_{St,ges,init}^*(H4-10)} \right \approx 1,9\%$
------	---

- **Zusammenfassung : Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*(H4-10)$**

Da $k_{St,ges}^*(H4-10)$ kein lineares Verhalten in Abhängigkeit von allen Parametern in deren Vertrauensbereich hat, muss die Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*(H4-10)$ mit den beiden ungünstigsten Kombinationen der Parameter rückgerechnet werden :

o $k_{St,ges}^*(H4-10)$ ist minimal für:

- Q minimal: $Q_{gem}(H4-10) = 8,95 \text{ m}^3/\text{s}$
- J maximal: $J(H4-10) = 0,496 \text{ ‰}$
- Wsp maximal: $Wsp(H4-10) = 10,01 \text{ m}$
- Tf_{li} 3,73 m entfernt von linker Ufer
- Tf_{re} 14,77 m entfernt von linker Ufer

Diese Kombination liefert:

$$k_{St,ges}^*(H4-10) \min = 17,87 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

o $k_{St,ges}^*(H4-10)$ ist maximal für:

- Q maximal: $Q_{gem}(H4-10) = 9,89 \text{ m}^3/\text{s}$
- J minimal: $J(H4-10) = 0,482 \text{ ‰}$
- Wsp minimal: $Wsp(H4-10) = 9,99 \text{ m}$
- Tf_{li} 4,46 m entfernt von linker Ufer
- Tf_{re} 13,77 m entfernt von linker Ufer

Diese Kombination liefert:

$$k_{St,ges}^*(H4-10) \max = 21,34 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

Der rückgerechnete gesamte Strickler-Beiwert $k_{St,ges}^*(H4-10)$ kann wie folgt bestimmt werden :

[31]	$k_{St,ges,init}^*(H4-10) = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \text{ (s. Gl. [26])}$ $18 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \leq k_{St,ges}^*(H4-10) \leq 21 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ $\text{d.h. } \left \frac{\Delta k_{St,ges}^*(H4-10)}{k_{St,ges,init}^*(H4-10)} \right \approx 10\%$
------	---

4.4.1.3. Rückrechnung aus den Messungen im Frühjahr 2005 (nach Pflegemaßnahmen)

Es wurden ähnlicherweise die Eingangsparameter bestimmt und der initiale Wert und die Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*(F5-10)$ rückgerechnet.

4.4.1.3.1. Bestimmung der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*(F5-10)$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich
$Q_{gem}(F5-10)$ [m³/s]	10,0	+/- 5 %	[9.50 – 10.50]
$J(F5-10)$ [‰]	0,36	+/- 2 %	[0.353 – 0.367]
$W_{sp}(F5-10)$ [m]	9,76	+/- 1 cm	[9.75 – 9.77]
Tf_{li} [m Entfernung von linker Böschung]	4,46	- 0,73 m	[3.73 – 4.46]
Tf_{re} [m Entfernung von linker Böschung]	14,77	- 1 m	[13.77 – 14.77]
Profilgeometrie	laut Bild 2.1.-1	-	-

Tabelle 9 : Bestimmung der Eingangsparameter von $k_{St,ges}^*$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10$ m³/s

4.4.1.3.2. Rückrechnung von $k_{St,ges}^*(F5-10)$

Bei der Rückrechnung wurde auch hier der initiale Wert und die Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*(F5-10)$ untersucht.

4.4.1.3.2.1. initialer Wert von $k_{St,ges}^*(F5-10)$

$$F_{ges,init}(F5-10) = 14,96 \text{ m}^2$$

$$R_{hy,ges,init}(F5-10) = 1,246 \text{ m}$$

$$u_{ges,init}(F5-10) = 12,01 \text{ m}$$

$$[32] \quad k_{St,ges,init}^*(F5-10) = 30,43 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

4.4.1.3.2.2. Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*(F5-10)$ (durch Variierung der Parameter)

Der rückgerechnete gesamte Strickler-Beiwert $k_{St,ges}^*(F5-10)$ kann wie folgt bestimmt werden :

$$[33] \quad 28 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \leq k_{St,ges}^*(F5-10) \leq 33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$\text{d.h.} \quad \left| \frac{\Delta k_{St,ges}^*(F5-10)}{k_{St,ges,init}^*(F5-10)} \right| \approx 7\%$$

4.4.1.4. Schlussfolgerung nach Vergleich zwischen $k_{St,ges}^*(H4-10)$ und $k_{St,ges}^*(F5-10)$

Die beiden Fehlerschranken [31] und [33] sind im

Bild 32 dargestellt. Sie sind völlig verschieden (sie enthalten keinen gemeinsamen Wert), so dass man daraus schließen kann, dass die im Winter 2004/2005 durchgeführten Pflegemaßnahmen eine eindeutige nachgewiesene Beeinflussung auf den $k_{St,ges}^*$ -Wert gehabt haben.

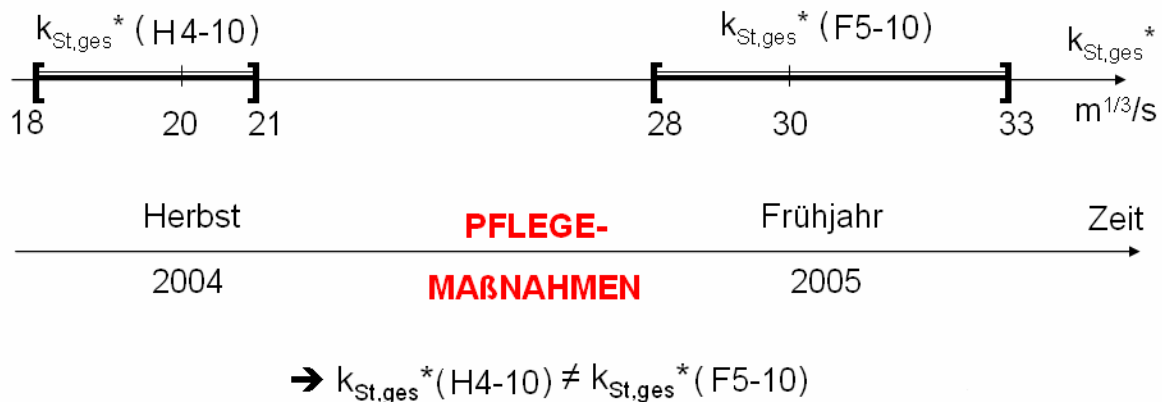


Bild 32 : Vergleich der rückgerechneten $k_{St,ges}^*(H4-10)$ und $k_{St,ges}^*(F5-10)$ mit ihren Fehlerschranken

Vergleich mit anderen Ergebnissen :

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft gibt in ihrem Forschungsbericht aus dem Jahr 1987 allgemein mögliche Fehlergrößen f_λ für den aus Messwerten rückgerechneten Widerstandsbeiwert λ_{ges} an. Bei einer Fehlergröße f_l für das Gefälle von 5% beträgt diese Fehlergröße f_λ [DFG, 1987]:

[34]	$f_\lambda = +21\% / -17\%$
------	-----------------------------

Für Q1 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/s$ entsprechen die rückgerechneten Strickler-Beiwerte $k_{St,ges}^*$ den folgenden Widerstandsbeiwerten (aus Gleichung [11] Abschnitt 3.1.3 ermittelt):

$$\lambda_{ges,init}^*(Q1-H04-10\text{m}^3/s) = 0,19$$

$$\lambda_{ges,min}^*(Q1-H04-10\text{m}^3/s) = 0,16 = \lambda_{ges,init}^*(Q1-H04-10\text{m}^3/s) - 16\%$$

$$\lambda_{ges,max}^*(Q1-H04-10\text{m}^3/s) = 0,23 = \lambda_{ges,init}^*(Q1-H04-10\text{m}^3/s) + 20\%$$

und

$$\lambda_{ges,init}^*(Q1-F05-10\text{m}^3/s) = 0,08$$

$$\lambda_{ges,min}^*(Q1-F05-10\text{m}^3/s) = 0,07 = \lambda_{ges,init}^*(Q1-F05-10\text{m}^3/s) - 14\%$$

$$\lambda_{ges,max}^*(Q1-F05-10\text{m}^3/s) = 0,10 = \lambda_{ges,init}^*(Q1-F05-10\text{m}^3/s) + 17\%$$

Es zeigt sich, dass diese Werte sehr gut mit jener der DFG (Gl. [34]) übereinstimmen.

4.4.2. Ermittlung der Eingangsparameter für die Berechnung des Manning-Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}$

Wie Bild 24 zeigt, sind die folgenden Eingangsparameter für die direkte Berechnung von $k_{St,ges}$ bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ für einen bestimmten Termin (es werden hier nur die Jahreszeiten Herbst 2004 und Frühjahr 2005 untersucht) notwendig :

- das Wasserspiegelgefälle J , das von dem untersuchten Profil, der Jahreszeit und dem eingestellten Durchfluss Q_{nom} abhängt. J ist nur für die Überlagerung nach DVWK (1991) notwendig. Es ist kein Eingangsparameter der Überlagerungen nach INDLEKOFER (2003 und 2005). (s. Abschnitt 3.2.3.2)
- die Wasserspiegelhöhe Wsp , die auch von dem untersuchten Profil, der Jahreszeit und dem eingestellten Durchfluss Q_{nom} abhängt.
- die Profilgeometrie Pr , die nur von dem untersuchten Profil abhängt. Es wird unabhängig von der Zeit angenommen (s. Nachweis im Abschnitt 4.4.1.2.1.2.)
- die Trennflächenfußpunkte Tf_{li} und Tf_{re} , die auch nur von dem untersuchten Profil abhängen. Sie werden auch unabhängig von der Zeit angenommen (s. Nachweis im Abschnitt 4.4.1.2.1.2.)
- ks_{so} , die auch nur von dem untersuchten Profil abhängt. (s. Nachweis im Abschnitt 4.4.2.1.2.1.)
- **Bewuchssparameter $a_{x,li}$, $a_{y,li}$, $d_{p,li}$, $a_{x,re}$, $a_{y,re}$ und $d_{p,re}$** , die auch nur von dem Profil abhängen (Ihre zeitliche Unabhängigkeit wird im Abschnitt 4.4.2.2.3. bewiesen).

Die Parameter Gefälle, Wasserspiegel, Profilgeometrie und Trennflächenfußpunkte wurden schon für die Termine im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005 bei der Bestimmung von $k_{St,ges}^*(H4-10)$ und $k_{St,ges}^*(F5-10)$ ermittelt. Die Bewuchssparameter $a_{x,li}$, $a_{y,li}$, $d_{p,li}$, $a_{x,re}$, $a_{y,re}$ und $d_{p,re}$ und die äquivalente Sandrauheit der Sohle ks_{so} sind noch zu bestimmen.

4.4.2.1. Bestimmung der äquivalenten Sandrauheit der Sohle ks_{so} im Profil

Wie am Anfang des Abschnitts 4.4 angeführt wird, wurden zwei Möglichkeiten untersucht, um die Sandrauheit der Sohle im Profil ks_{so} zu bestimmen. Zuerst wurden Informationen über ks_{so} aus der Sieblinie der Ausgangsschicht der Sohle bei dem Profil Q1 ermittelt (Abschnitt 4.4.2.1.1.), dann wurden diese Daten mit den Ergebnissen der Rückrechnung von ks_{so} anhand der gemessenen Durchflüsse und der Darcy-Weißbach Gleichung (Abschnitt 4.4.2.1.2.) gegenübergestellt. Im Gegensatz zu natürlichen Fließgewässern besteht hier der Vorteil, dass die Kornverteilung der Ausgangsschicht exakt angegeben wird, weil diese künstlich eingebaut wurde.

4.4.2.1.1. Aussage über die äquivalente Sandrauheit der Sohle $k_{s_{so}}$ aus der Untersuchung des Einbaumaterials im Russbach

Laut Abschnitt 3.1 kann die äquivalente Sandrauheit der Sohle $k_{s_{so}}$ mit dem Durchmesser $d_{90,US}$ der Unterschicht der Sohle bzw. mit dem mittleren Durchmesser $d_{m,D}$ der Deckschicht der Sohle gleich angenommen werden, wenn es wie im Russbach keine maßgebende Verformung der Sohle aufgrund eines Sedimenttransports gibt. Außerdem muss theoretisch die äquivalente Sandrauheit der Sohle kleiner oder maximal gleich dem maximalen Durchmesser des Bettungsmaterials d_{max} sein.

Die für den Russbach im Jahre 1990 vom Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Wien durchgeführte Untersuchung des Einbaumaterials hat die Sieblinie der Unterschicht (syn. Ausgangschicht) der Sohle geliefert (s. Anhang 10). Aus dieser gemessenen Sieblinie kommt für das Profil Q1:

$$d_{90,US} = 0,100 \text{ m}$$

Man kann auch aus dieser Sieblinie gut prognostizieren:

$$d_{max} = 0,130 \text{ m}$$

Eine weitere vom Wasserbau Institut der TU-Wien durchgeführte Auswertung der Sieblinie der Ausgangschicht der Sohle anhand des Günter-Verfahrens hat erlaubt, die entsprechende Sieblinie der Deckschicht der Sohle zu ermitteln (s. Anhang 10). Aus dieser zweiten berechneten Sieblinie kommt:

$$d_{m,D} = 0,085 \text{ m}$$

Da die gemessenen Sieblinien des Einbaumaterials keine große Genauigkeit hat, kann daraus geschlossen werden, dass der Ansatz $d_{90,US} \approx d_{m,D}$ hier berechtigt ist.

Folgende Informationen über $k_{s_{so}}$ wurden aus der Untersuchung des Einbaumaterials ermittelt:

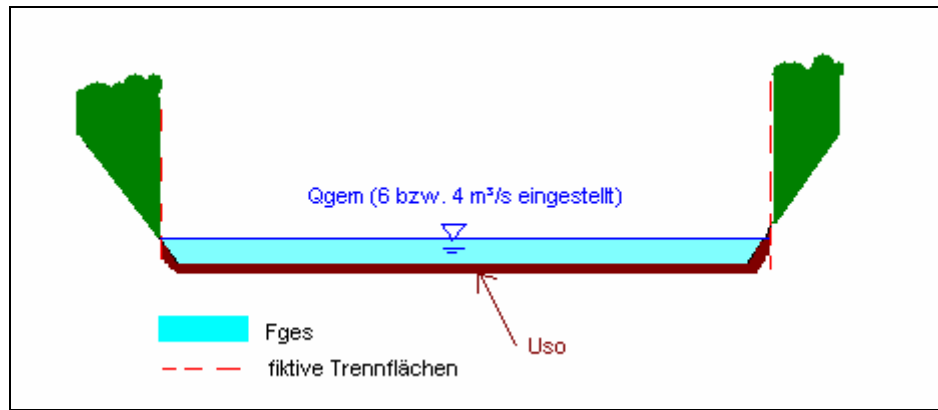
[35]	$\left\{ \begin{array}{l} k_{s_{so}}(Q1) \approx d_{90,US} \approx d_{m,D} \approx 0,09 \text{ m} \\ k_{s_{so}}(Q1) \leq 0,130 \text{ m} \end{array} \right.$
------	---

4.4.2.1.2. Rückrechnung der äquivalenten Sandrauheit der Sohle $k_{s_{so}}$ mit der Darcy-Weißbach Gleichung und den gemessenen Durchflüssen

Jede Rückrechnung setzt zunächst die Bestimmung bzw. Festlegung der Eingangsparameter voraus. Danach folgt die eigentliche Berechnung.

4.4.2.1.2.1. Eingangsparameter und Annahmen zur Bestimmung von $k_{s_{so}}$

Die Rückrechnung erfolgt bei jenen Durchflüssen, bei denen der Wasserspiegel unterhalb den Trennflächenfußpunkten liegt (d.h., unterhalb der Bewuchszonen auf den Böschungen und demnach unter 9,21 m, s. Bild 22). Dafür wurden die Messungen bei $Q_{nom} = 4$ bzw. 6 m^3/s herangezogen.

Bild 33 : Schematische Darstellung eines typischen Profils bei $Q_{\text{nom}} = 6$ bzw. $4 \text{ m}^3/\text{s}$ eingestelltHydraulischer Ansatz :

In diesem Fall kann man schreiben:

$$Q_{\text{gem}} = F_{\text{ges}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{so}}}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot Rhy_{\text{ges}} \cdot J}$$

Mit :

$$Rhy_{\text{ges}} = \frac{F_{\text{ges}}}{U_{\text{ges}}} \text{ und hier } U_{\text{ges}} = U_{\text{so}} \text{ (laut Bild 33)}$$

Und, in einer allgemeinen Schreibweise :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{so}}}} = a \cdot \text{Log} \left(\frac{14,84 \cdot f \cdot Rhy_{\text{ges}}}{ks_{\text{so}}} \right)$$

Wobei :

$$\begin{cases} a = 2,0 \\ f = 1 \end{cases} \text{ für eine Definition von } \lambda \text{ nach der Empfehlungen der DVWK-91 (s. Gleichung [5])}$$

Oder

$$\begin{cases} a = 2,035 \\ f = 0,9 - 0,38 \cdot e^{-5F_{\text{ges}}/b_F^2} \end{cases} \text{ für den Ansatz nach Schröder (1990) (s. Gleichungen [6] und [8])}$$

d.h. :

$$[36] \quad ks_{\text{so}} = \frac{14,84 \cdot f \cdot Rhy_{\text{ges}}}{10^{\frac{a \cdot F_{\text{ges}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot Rhy_{\text{ges}} \cdot J}}{Q_{\text{gem}}}}}$$

So dass :

[37]	$ks_{so} = g(Q_{gem}, J, W_{sp}, Pr)$
------	---------------------------------------

g : Funktion

wobei der gemessene Durchfluss Q_{gem} , das Wasserspiegelgefälle J , die Wasserspiegelhöhe W_{sp} und die Profilgeometrie Pr unabhängig gemessene Parameter sind.

zur Verfügung stehende Messdaten:

Da es keinen hydraulisch bedeutenden Sedimenttransport im Russbach gibt und deshalb die Sohle im Russbach sich mit der Zeit kaum verformt, kann angenommen werden, dass ks_{so} zeitlich unabhängig konstant ist. Demnach müssten alle Messtermine, die die oben genannte Voraussetzung über dem gemessenen Durchfluss erfüllen, den gleichen Wert für ks_{so} ergeben. Die ausgewählten Messtermine mit den entsprechenden gemessenen Parametern sind in den drei folgenden Tabellen zusammengestellt:

Messtermin	Eingestellter nominaler Durchfluss $Q_{nom} [m^3/s]$	Gemessener Durchfluss $Q_{gem} [m^3/s]$	Wasserspiegelhöhe $W_{sp} [m]$
Herbst 2004	6	5,98	9,36
Frühjahr 2005	4	4,10	8,98
Frühjahr 2005	6	5,90	9,26
Herbst 2005	6	6,03	9,27

Tabelle 10 : Ausgewählte Messtermine für die Rückrechnung von ks_{so} mit den gemessenen Eingangsparametern Q_{gem} und zugehöriger Wasserspiegelhöhe

Messtermin	Längsschnitt der Wasserstände in der Referenz-Strecke R1	Querprofil im Profil Q1
Herbst 2004 $Q_{\text{nom}}=6\text{m}^3/\text{s}$	Wasserstand zw Profil "06,53" und "RB1" bei $6\text{m}^3/\text{s}$ in H04	
Frühjahr 2005 $Q_{\text{nom}}=4\text{m}^3/\text{s}$	wasserstand zw Profil "06,53" und "RB1" bei $4\text{m}^3/\text{s}$ in F05	

Tabelle 11 : Längs- und Querprofile am Russbach bei den ausgewählten Messterminen für die Rückrechnung von ks_{so} (im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$)

Messtermin	Längsschnitt der Wasserstände in der Referenz-Strecke R1	Querprofil im Profil Q1
Frühjahr 2005 $Q_{\text{nom}}=6\text{m}^3/\text{s}$	wasserstand zw Profil "06,53" und "RB1" in Q1 in F05 bei $6\text{m}^3/\text{s}$	
Herbst 2005 $Q_{\text{nom}}=6\text{m}^3/\text{s}$	wasserstand zw Profil "06,53" und "RB1" in Q1 in H05 bei $6\text{m}^3/\text{s}$	

Tabelle 12 : Längs- und Querprofile am Russbach bei den ausgewählten Messterminen für die Rückrechnung von ks_{50} (im Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Herbst 2005)

Laut der Tabelle 11 und der Tabelle 12 befindet sich der Wasserspiegel nur bei dem Termin im Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ tatsächlich unter dem Bewuchsrand ($W_{\text{sp}} < 9,21 \text{ m}$). Die Gleichung [36] kann daher bei diesem Messtermin angewendet werden. Bei den drei anderen Terminen (jeweils $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$) ist der Wasserspiegel über dem Vegetationsrand, so dass zusätzliche Annahmen zu treffen sind, um die Gleichung [36] trotzdem für die Rückrechnung von ks_{so} benutzen zu dürfen.

Definition des wirksamen Hauptdurchflussquerschnitts für die Termine bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$:

- Einfluss des Bewuchses auf den Durchfluss bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$:

Für die maximale Wasserspiegelhöhe $W_{\text{sp}} = 9,36 \text{ m}$ (für den Termin im Herbst 2004) haben wir nur einen marginalen Wasserstand im Bewuchsbereich: die beiden Trennflächenhöhen $h_{T,li}$ und $h_{T,re}$ sind sehr klein (mit dem Nachweis $\frac{h_T}{ks_{so}} \leq 1$ weiter zu bestätigen). Der Einfluss des Bewuchses auf den Durchfluss kann somit vernachlässigt werden und nur der Einfluss von ks_{so} im Hauptabflussbereich wird berücksichtigt. Es werden für die drei Termine im Herbst 2004, im Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Herbst 2005 die folgenden Ansätze (laut KRADOLFER (1983)) in der Gleichung [36] benutzt:

$$\begin{cases} U_{\text{ges}} = U_{\text{so}} + h_{T,li} + h_{T,re} \\ F_{\text{ges}} = \text{Fläche des Hauptabflussbereiches} \end{cases}$$

- Einfluss des Böschungsknickes am rechten Ufer auf den Durchfluss bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$:

Eine weitere Eigenschaft des Profils ist auch für die drei Termine bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ zu berücksichtigen. Für $W_{\text{sp}} > 9,20 \text{ m}$ ist einen Böschungsknick an der rechten Böschung im Wasser vorhanden. Im Wasserbereich nach diesem Knick ist die Wassertiefe $t_{w,k}$ bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ deutlich niedriger als im Rest des Durchflussquerschnitts ($t_{w,k}$ bis maximal 16 cm während die mittlere Wassertiefe in dem Hauptabflussbereich $t_{w,m} \approx 1,2 \text{ m}$ ist). Wenn $t_{w,k}$ von gleicher Größenordnung wie ks_{so} ist, dann darf der Durchflussbereich nach dem Böschungsknick bei dem Hauptquerschnitt nicht mitgezählt werden (der Querschnitt ist nicht mehr kompakt). Es werden daher zwei Varianten A und B (s. Bild 34) für die Position der rechten Trennfläche berücksichtigt. Bei der Variante A ist die Trennfläche auf dem Böschungsknick, bei der Variante B ist sie am Rand des Bewuchses gestellt. Der erste Schritt (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.2) beschäftigt sich mit der Wahl der geeigneten Variante.

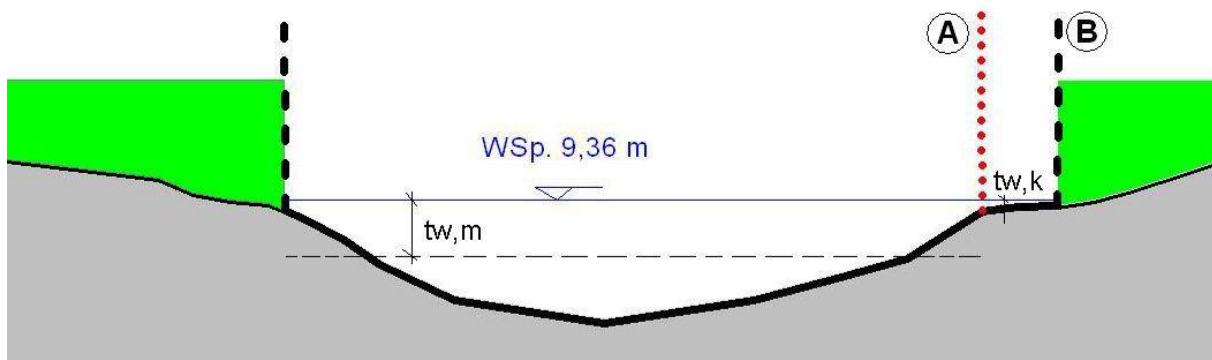


Bild 34 : Variante A und B für die Position der rechten Trennfläche

Nach Wahl der geeigneten Annahmen ergibt sich :

[38]	$ks_{so} = ks_{so}(H4-6) = ks_{so}(F5-4) = ks_{so}(F5-6) = ks_{so}(H5-6)$
------	---

Zur Erinnerung (s. Ende der Einleitung im Abschnitt 4.4) :

$ks_{so}(H4-6)$:	rückgerechnete äquivalente Sandrauheit der Sohle mit den Messungen aus dem Messtermin im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$
$ks_{so}(F5-4)$:	rückgerechnete äquivalente Sandrauheit der Sohle mit den Messungen aus dem Messtermin im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$
$ks_{so}(F5-6)$:	rückgerechnete äquivalente Sandrauheit der Sohle mit den Messungen aus dem Messtermin im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$
$ks_{so}(H5-6)$:	rückgerechnete äquivalente Sandrauheit der Sohle mit den Messungen aus dem Messtermin im Herbst 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Zusammenfassung :

Um die Rückrechnung von ks_{so} durchzuführen, sind verschiedene Annahmen festzulegen. Sie betreffen:

- den anzuwendenden Ansatz für die Definition von λ_{so}
- die Wahl der anzuwendenden Wasserstand-Messstationen für die Definition des Wasserspiegelgefälles J
- die Position der rechten Trennfläche

Diese Annahmen wurden in vier verschiedenen Berechnungsvorgängen untersucht.

4.4.2.1.2.2. Erster Berechnungsvorgang für die Rückrechnung von ks_{so}

Hier wird der Einfluss des Böschungsknicks untersucht. Die Rückrechnung wird zum Ersten nur mit den Daten aus dem Messtermin im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt.

Annahmenkombination (1) für die Rückrechnung :

Die hier betrachteten Annahmen für die Rückrechnung der äquivalenten Sandrauheit der Sohle sind :

- für die Definition von λ_{so} : $\frac{1}{\sqrt{\lambda_{so}}} = 2 \cdot \log\left(\frac{14,84 \cdot Rhy_{ges}}{ks_{so}}\right)$ ([DVWK, 1991] und [INDLEKOFER, 2003, 2005])
- für die Definition des Wasserspiegelgefälles : Das Wasserspiegelgefälle wird als mittleres Gefälle der Referenz-Strecke R1 (J_M genauer genannt) angenommen und wird zwischen die Messstationen „06.53 “ und RB1 berechnet (entspricht der Annahme der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal)
- für die Position der rechten Trennfläche : Variante B (Trennfläche am Rand des Bewuchses, s. Bild 34)

Die aus dieser Annahmenkombination (1) ermittelte äquivalente Sandrauheit der Sohle für den Messtermin im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ wird $ks_{so}^{(1)}(H4-6)$ genannt.

Initiale Werte der Eingangsparameter :

Die für die Auswertung der Gleichung [36] angewendeten Eingangsparameter sind in der Tabelle 13 für den Messtermin im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ zusammengefasst.

Parameter	initialer Wert
$Q_{\text{gem}}(\text{H4-6}) [\text{m}^3/\text{s}]$	5.98
$J_{\text{M}}(\text{H4-6}) [\text{‰}]$	0.400
$W_{\text{sp}}(\text{H4-6}) [\text{m}]$	9.36
Profilgeometrie Pr	Laut Bild 22 und Variante B laut Bild 34

Tabelle 13 : Bestimmung der Eingangsparameter von ks_{so} im Q1 im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$, mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennflächen laut Variante B definiert.

$J_{\text{M}}(\text{H4-6}) [\text{‰}]$: Wasserspiegelgefälle für das Profil Q1 im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert

Ergebnisse :

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt :

$$F_{\text{ges,init}}^{(1)}(\text{H4-6}) = 10.83 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{hy,ges,init}}^{(1)}(\text{H4-6}) = 0.967 \text{ m}$$

Und mit der Gleichung [36] :

$ks_{\text{so,init}}^{(1)}(\text{H4-6}) = 0.374 \text{ m}$
--

Zur Verdeutlichung der einzelnen Parameter :

$F_{\text{ges,init}}^{(1)}(\text{H4-6}) [\text{m}^2]$: Initialer Wert der Fläche des Hauptabflussbereiches im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ für den ersten Berechnungsvorgang von ks_{so} (Annahmenkombination (1))

$R_{\text{hy,ges,init}}^{(1)}(\text{H4-6}) [\text{m}]$: Initialer Wert des hydraulischen Radius des Hauptabflussbereiches im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ für den ersten Berechnungsvorgang von ks_{so} (Annahmenkombination (1))

$ks_{\text{so,init}}^{(1)}(\text{H4-6}) [\text{m}]$: Initialer Wert der rückgerechneten Sandrauheit ks_{so} im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ für den ersten Berechnungsvorgang von ks_{so} (Annahmenkombination (1))

Für den Messtermin im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ und die Variante B für die Position der rechten Trennfläche sind :

$$h_{\text{T,li}}^{(1)}(\text{H4-6}) = 0,15 \text{ m}$$

$$h_{\text{T,re}}^{(1)}(\text{H4-6}) = 0,09 \text{ m}$$

$$t_{\text{w,k}}(\text{H4-6}) = 0,12 \text{ m}$$

so dass :

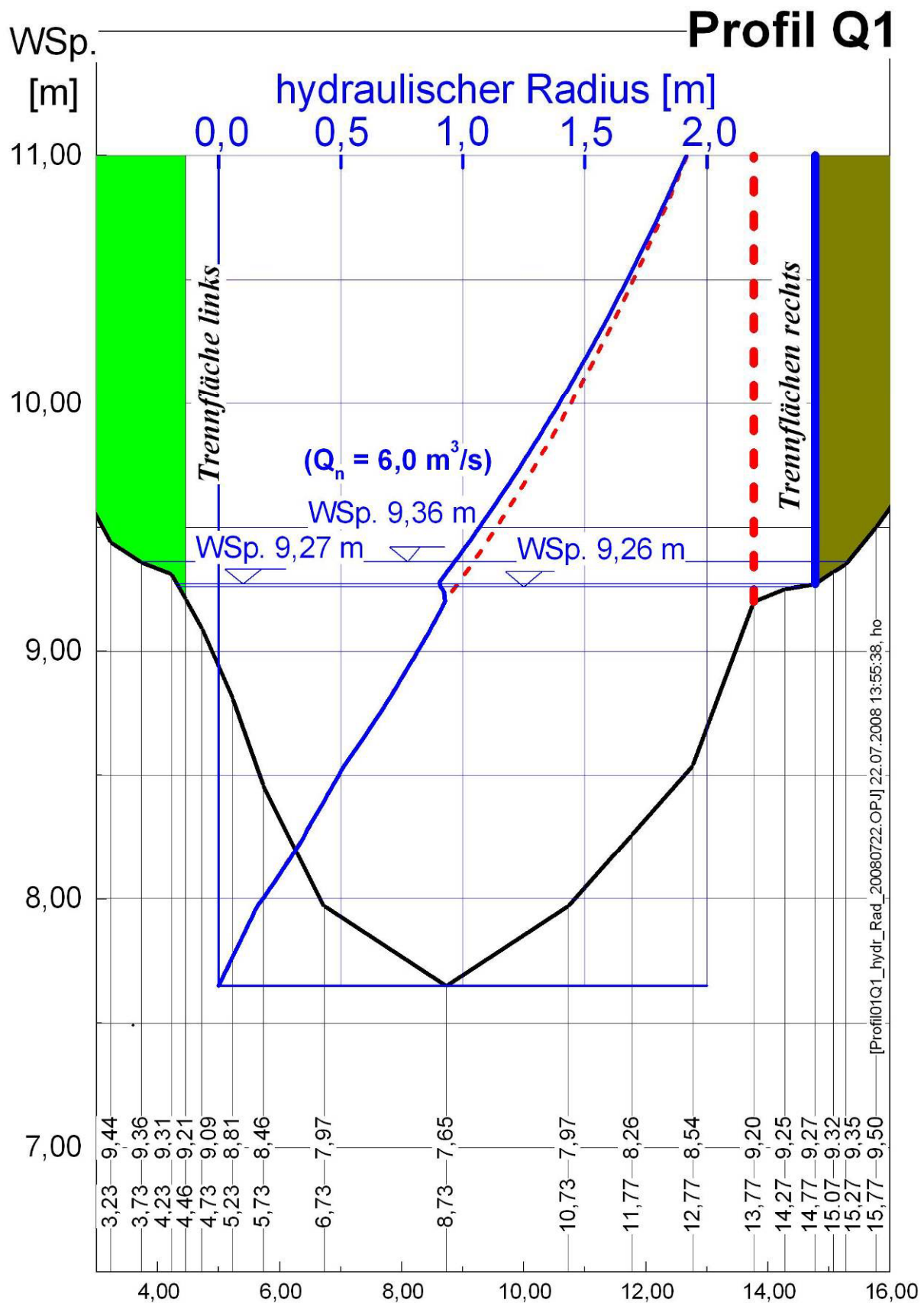
$$[39] \quad \begin{cases} ks_{\text{so,init}}^{(1)}(\text{H4-6}) \geq 2 \cdot h_{\text{T,li}}^{(1)}(\text{H4-6}) \\ ks_{\text{so,init}}^{(1)}(\text{H4-6}) \geq 4 \cdot h_{\text{T,re}}^{(1)}(\text{H4-6}) \\ ks_{\text{so,init}}^{(1)}(\text{H4-6}) \geq 3 \cdot t_{\text{w,k}}(\text{H4-6}) \end{cases}$$

Schlussfolgerung :

Man kann mit den Werten aus [39] belegen, dass der Einfluss des Bewuchses tatsächlich vernachlässigbar ist und, dass kein Wasser im Bereich nach dem Böschungsknick am rechten Ufer fließt. Die Variante B für die Position der rechten Trennfläche (T_{fe} am Rand des Bewuchses) ist daher nicht mehr weiter zu berücksichtigen. Die weiteren Rückrechnungen sollen mit der Variante A durchgeführt werden : die rechte Trennfläche muss am Böschungsknick positioniert werden.

Ein weiteres Argument für diese Annahme kommt aus der Darstellung des hydraulischen Radius R_{hy} in Abhängigkeit von der Wasserspiegelhöhe W_{sp} im Profil im Bild 35. Es zeigt sich ein Rückgang, wenn sich der Wasserspiegel in der Höhe des Böschungsknicks ($W_{sp} = 9,20$ m) befindet und die rechte Trennfläche T_{fe} am Rand des Bewuchses positioniert wird (Variante B). Dieser Sprung erscheint nicht mehr, wenn T_{fe} am Böschungsknick gewählt wird (Variante A). Der Unterschied zwischen den beiden Varianten wird kleiner, wenn die Wasserspiegelhöhe W_{sp} größer wird. Bei $W_{sp} \geq 10$ m (typischerweise W_{sp} bei $Q_{nom} = 10$ m³/s) kann man den Unterschied vernachlässigen. Dies zeigt, dass der Querschnitt bei der Variante B nicht kompakt berücksichtigt werden darf, wenn sich die Wasserspiegelhöhe W_{sp} in der Höhe des Böschungsknicks befindet. Dies gilt insbesondere für die drei Termine bei $Q_{nom} = 6$ m³/s.

Außerdem ist der hier ermittelte Wert $ks_{so,init}^{(1)}(H4-6)$ viel höher als jene aus der Sieblinie ermittelten Werte (s. Gleichung [35] im Abschnitt 4.4.2.1.1). Die hier betrachteten Annahmen sind nicht befriedigend und müssen geändert werden.

Bild 35 : Hydraulischer Radius R_{hy} in Abhängigkeit von der Wasserspiegelhöhe WSp im Profil Q1

4.4.2.1.2.3. Zweiter Berechnungsvorgang für die Rückrechnung von ks_{so}

Hier wird nur die Annahme über die Position der rechten Trennfläche geändert. Die Variante A (s. Bild 34) wird angenommen. Die vier Messtermine werden hier untersucht. Die initialen Werte und die Fehlerschranken von $ks_{so}^{(2)}(H4-6)$, $ks_{so}^{(2)}(F5-4)$, $ks_{so}^{(2)}(F5-6)$ und $ks_{so}^{(2)}(H5-6)$ werden dieses Mal berechnet.

$ks_{so}^{(2)}(H4-6)$ [m] :	rückgerechnete Sandrauheit ks_{so} im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ für den zweiten Berechnungsvorgang von ks_{so} (Annahmenkombination (2))
$ks_{so}^{(2)}(F5-4)$ [m] :	rückgerechnete Sandrauheit ks_{so} im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ für den zweiten Berechnungsvorgang von ks_{so} (Annahmenkombination (2))
$ks_{so}^{(2)}(F5-6)$ [m] :	rückgerechnete Sandrauheit ks_{so} im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ für den zweiten Berechnungsvorgang von ks_{so} (Annahmenkombination (2))
$ks_{so}^{(2)}(H5-6)$ [m] :	rückgerechnete Sandrauheit ks_{so} im Herbst 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ für den zweiten Berechnungsvorgang von ks_{so} (Annahmenkombination (2))

Annahmenkombination (2) für die Rückrechnung :

Die Annahmen für die Rückrechnung von $ks_{so}^{(2)}$ sind somit :

- für die Definition von λ_{so} : $\frac{1}{\sqrt{\lambda_{so}}} = 2 \cdot \text{Log} \left(\frac{14,84 \cdot Rhy_{ges}}{ks_{so}} \right)$ ([DVWK, 1991] und [INDLEKOFER, 2003, 2005])
- für die Definition des Wasserspiegelgefälles : Das Gefälle wird als mittleres Gefälle der Referenz-Strecke R1 angenommen und wird zwischen den Messstationen „06.53“ und RB1 berechnet (entspricht der Annahme der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal)
- **für die Position der rechten Trennfläche : Variante A** (Trennfläche am Böschungsknick, s. Bild 34)

Rückrechnung von $ks_{so}^{(2)}$

Die komplette Untersuchung mit den Daten aus dem Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ wird nachfolgend präsentiert. Die Daten aus den weiteren Messterminen wurden ähnlich verarbeitet.

- Eingangsparameter für die Rückrechnung von $ks_{so}^{(2)}(H4-6)$:

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich
$Q_{gem}(H4-6)$ [m^3/s]	5,98	+/- 5 %	[5,68 – 6,28]
$J_M(H4-6)$ [‰]	0,400	+/- 2 %	[0,393 – 0,407]
$Wsp(H4-6)$ [m]	9,36	+/- 1 cm	[9,35 – 9,37]
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A (Bild 34)	-	-

Tabelle 14 : Bestimmung der Eingangsparameter von ks_{so} im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

- Initialer rückgerechneter Wert von $ks_{so}^{(2)}(H4-6)$

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt:

$$F_{ges,init}^{(2)}(H4-6) = 10,71 \text{ m}^2$$

$$Rhy_{ges,init}^{(2)}(H4-6) = 1,043 \text{ m}$$

Und mit der Gleichung [36] :

$$ks_{so,init}^{(2)}(H4-6) = 0,444 \text{ m}$$

- Bestimmung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(2)}(H4-6)$

Die Sensitivitätsanalyse wurde wie im Abschnitt 4.4.1.2.2.2 durchgeführt.

- Fehler für die rückgerechnete äquivalente Sandrauheit der Sohle (ks_{so}) aufgrund des gemessenen Durchflusses (Q_{gem})

Es gibt eine explizite Funktion für ks_{so} in Abhängigkeit von Q_{gem} . Aus der Gleichung [36] kommt:

$$[40] \quad ks_{so} = \frac{\gamma}{10^{\frac{Q_{gem}}{\delta}}}$$

$$\text{mit } \gamma = 14,84 \cdot Rhy_{ges,init} \text{ und } \delta = 2 \cdot F_{ges,init} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot Rhy_{ges,init} \cdot J_{M,init}}$$

Die Berechnungen von γ und δ mit den Daten aus dem Messtermin im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ ergeben :

$$\gamma^{(2)}(H4-6) = 15,48 \text{ m} \quad \text{und} \quad \delta^{(2)}(H4-6) = 3,88 \text{ m}^3/\text{s}$$

Die Funktion $ks_{so}^{(2)}(H4-6) = f(Q_{gem})$ wird im Bild 36 und Bild 37 dargestellt.

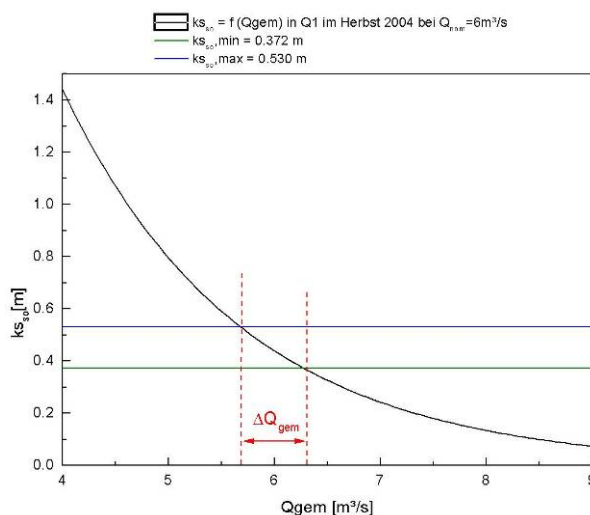


Bild 36 : (links) $ks_{so}^{(2)}$ im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ in Abhängigkeit von Q_{gem} mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

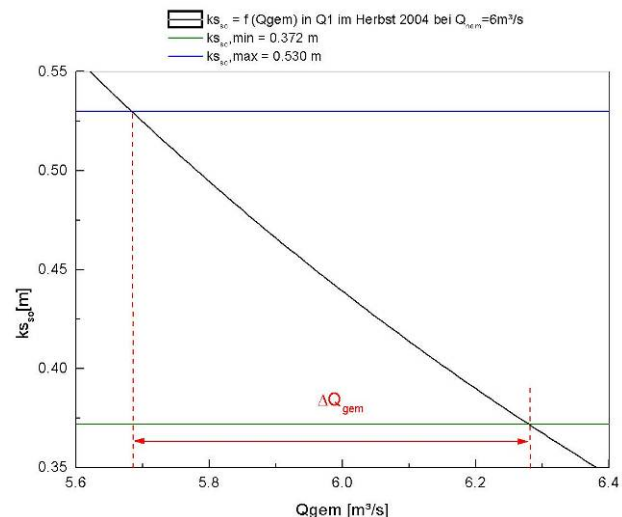


Bild 37 : (rechts) $ks_{so}^{(2)}$ im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ in Vertrauensbereich von Q_{gem} mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Im Vertrauensbereich von Q_{gem} kann angenommen werden, dass $ks_{so}^{(2)}(H4-6)$ ein lineares Verhältnis in Abhängigkeit von Q_{gem} hat, so dass geschrieben werden darf, dass:

$$\left| \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(H4-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(H4-6)} \right|_{Q_{gem}} = \left| \frac{ks_{so}^{(2)}(Q_{gem}(H4-6))_{min} - ks_{so}^{(2)}(Q_{gem}(H4-6))_{max}}{2 \cdot ks_{so,init}^{(2)}(H4-6)} \right|$$

$$\left| \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(H4-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(H4-6)} \right|_{Q_{gem}} = 18\%$$

- **Fehler für die rückgerechnete äquivalente Sandrauheit der Sohle (ks_{so}) aufgrund des Gefälles (J_M)**

Es gibt eine explizite Funktion für ks_{so} in Abhängigkeit von J_M :

$$[41] \quad ks_{so} = \frac{\gamma}{\frac{v}{10 J_M^{1/2}}}$$

$$v = \frac{Q_{gem,init}}{2 \cdot F_{ges,init} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot Rhy_{ges,init}}} \text{ und } \gamma \text{ wie oben eingeführt.}$$

Die Berechnungen von γ und v mit den Daten aus dem Messtermin im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ ergeben:

$$\gamma^{(2)}(H4-6) = 15,48m \quad \text{und} \quad v^{(2)}(H4-6) = 0,031$$

Die Funktion $ks_{so}^{(2)}(H4-6) = f(J_M)$ wird im Bild 38 und im Bild 39 dargestellt.

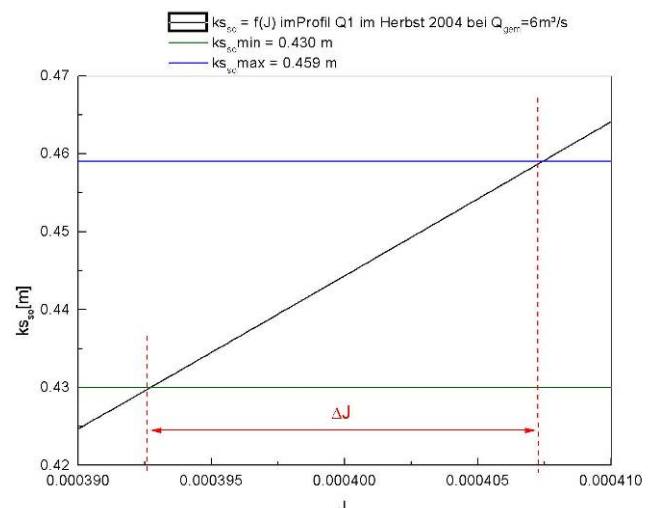
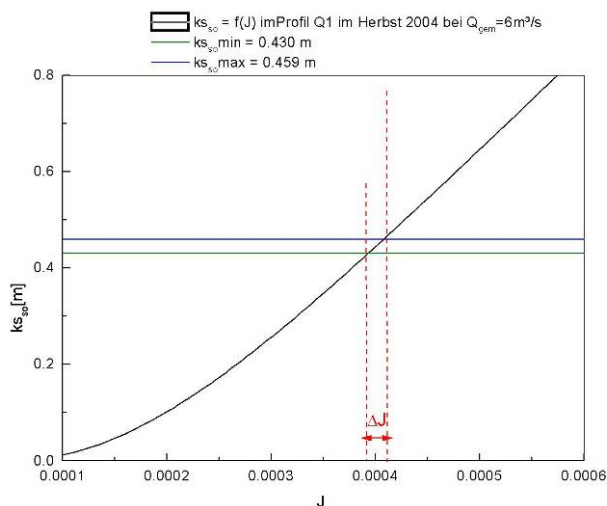


Bild 38 : $ks_{so}^{(2)}$ im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ in Abhängigkeit von J_M mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Bild 39 : $ks_{so}^{(2)}$ im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ in Vertrauensbereich von J_M mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Im Vertrauensbereich von J_M kann wie im Abschnitt 4.4.1.2.2.2 angenommen werden, dass $ks_{so}^{(2)}(H4-6)$ ein lineares Verhältnis in Abhängigkeit von J_M hat, so dass geschrieben werden darf, dass:

$$\left| \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(H4-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(H4-6)} \right|_{J_M} = \left| \frac{ks_{so}^{(2)}(J_M(H4-6))_{\min} - ks_{so}^{(2)}(J_M(H4-6))_{\max}}{2 \cdot ks_{so,init}^{(2)}(H4-6)} \right|$$

$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(H4-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(H4-6)} \right _{J_M} = 3\%$
--

- Fehler für die rückgerechnete äquivalente Sandrauheit der Sohle (ks_{so}) aufgrund des Wasserspiegels (Wsp)

Es gibt keine einfache explizite Funktion, die das Verhältnis von ks_{so} in Abhängigkeit von Wsp darstellt. Der Fehler für ks_{so} aufgrund Wsp wird deshalb wie der Fehler für $k_{St,ges}^*$ aufgrund Wsp im Abschnitt 4.4.1.2.2.2 ermittelt.

Die Rückrechnungen haben geliefert:

Wsp [m]	Wsp _{init} -1cm	Wsp _{init} -0,5cm	Wsp _{init}	Wsp _{init} +0,5cm	Wsp _{init} +1cm
	9,350	9,355	9,360	9,365	9,370
ks_{so} aus D.W. [m]	0,423	0,433	0,444	0,455	0,467

Tabelle 15 : $ks_{so}^{(2)}(Q1-H04-6m^3/s)$ im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 m^3/s$ in Vertrauensbereich von Wsp mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

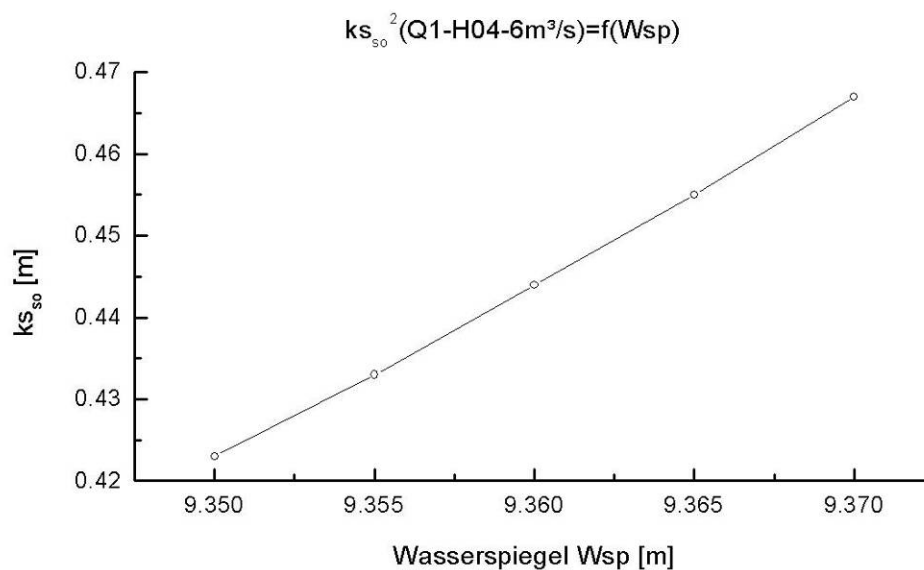


Bild 40 : ks_{so} im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 m^3/s$ im Vertrauensbereich von Wsp mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Es darf auch hier geschrieben werden dass :

$$\left| \frac{\Delta k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6)}{k_{s_{so,init}}^{(2)}(H4-6)} \right|_{Wsp} = \left| \frac{k_{s_{so}}^{(2)}(Wsp(H4-6))_{\min} - k_{s_{so}}^{(2)}(Wsp(H4-6))_{\max}}{2 \cdot k_{s_{so,init}}^{(2)}(H4-6)} \right|$$

$\left \frac{\Delta k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6)}{k_{s_{so,init}}^{(2)}(H4-6)} \right _{Wsp} = 5\%$
--

- Zusammenfassung: Fehlerschranke von $k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6)$

Da $k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6)$ kein echtes lineares Verhalten in Abhängigkeit von allen Parametern in seinem Vertrauensbereich hat, soll die Fehlerschranke von $k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6)$ wie die Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*$ im Abschnitt 4.4.1.2.2.2 mit den beiden ungünstigsten Kombinationen der Parameter rückgerechnet werden :

- o $k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6)$ ist minimal für :
 - Q maximal: $Q_{gem}(H4-6m) = 6.28 \text{ m}^3/\text{s}$
 - J minimal: $J_M(H4-6) = 0.393 \text{ ‰}$
 - Wsp minimal: $Wsp(H4-6) = 9.35 \text{ m}$

Diese Kombination liefert:

$$k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6)_{\min} = 0.341 \text{ m}$$

- o $k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6)$ ist maximal für:
 - Q minimal: $Q_{gem}(H4-6) = 5.68 \text{ m}^3/\text{s}$
 - J maximal: $J_M(H4-6) = 0.407 \text{ ‰}$
 - Wsp maximal: $Wsp(H4-6) = 9.37 \text{ m}$

Diese Kombination liefert:

$$k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6)_{\max} = 0.573 \text{ m}$$

Somit:

$[42] \quad k_{s_{so,init}}^{(2)}(H4-6) = 0,44 \text{ m}$ $0,34 \text{ m} \leq k_{s_{so}}^{(2)}(H4-6) \leq 0,57 \text{ m}$
--

Die Untersuchungen mit der Annahmenkombination (2) und den Daten aus den drei weiteren Messterminen im :

- Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$
- Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$
- Herbst 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

haben gezeigt, dass $k_{s_{so}}^{(2)}$ für jeden Termin ein ähnliches Verhalten in Abhängigkeit vom jeweiligen Parameter wie im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ (quasi-lineares Verhalten mit allen Parametern) aufweist. Die Ergebnisse der Fehleruntersuchungen sind im Anhang 12 für jeden Messtermin zusammengefasst.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen :

Messtermin	Initialer Wert	Fehlerschranke
Herbst 2004/ $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{\text{so,init}}^{(2)}(\text{H4-6}) = 0,44 \text{ m}$	$0,34 \text{ m} \leq ks_{\text{so}}^{(2)}(\text{H4-6}) \leq 0,57 \text{ m}$
Frühjahr 2005/ $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{\text{so,init}}^{(2)}(\text{F5-4}) = 0,15 \text{ m}$	$0,11 \text{ m} \leq ks_{\text{so}}^{(2)}(\text{F5-4}) \leq 0,21 \text{ m}$
Frühjahr 2005/ $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{\text{so,init}}^{(2)}(\text{F5-6}) = 0,23 \text{ m}$	$0,17 \text{ m} \leq ks_{\text{so}}^{(2)}(\text{F5-6}) \leq 0,31 \text{ m}$
Herbst 2005/ $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{\text{so,init}}^{(2)}(\text{H5-6}) = 0,21 \text{ m}$	$0,15 \text{ m} \leq ks_{\text{so}}^{(2)}(\text{H5-6}) \leq 0,29 \text{ m}$

Tabelle 16 : aus den verschiedenen Messterminen ermittelte initiale Werte und Fehlerschranken von $ks_{\text{so}}^{(2)}$

Die aus den verschiedenen Messterminen ermittelten initialen Werte und Fehlerschranken von $ks_{\text{so}}^{(2)}$ sind in der Tabelle 16 zusammengestellt und im ersten Punkt des Bild 42 auf Seite 86 dargestellt. Sie werden mit den Ergebnissen aus der Untersuchung des Einbaumaterials verglichen. Die folgenden Schlussfolgerungen sind aus diesem Vergleich herauszuziehen:

Messtermin	Vorteil des ermittelten $ks_{\text{so}}^{(2)}$	Nachteil des ermittelten $ks_{\text{so}}^{(2)}$
Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$		- $ks_{\text{so}}^{(2)}(\text{H4-6})$ ist viel höher als die rückgerechneten $ks_{\text{so}}^{(2)}$ bei den drei anderen Terminen - die Fehlerschranke enthält keinen Wert aus den Sieblinien - eine Annahme über den Einfluss des Bewuchs auf den Durchfluss wurde notwendig für die Anwendung der Gleichung [36]
Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	- die Gleichung [36] ist in diesem Fall ohne Annahme verwendbar (kein Bewuchs im Wasser) - Im Vergleich zu den anderen Terminen nähern sich die Werte besser aus den Sieblinien: $d_{90,\text{US}}$ gehört zu der Fehlerschranke	- Die Fehlerschranke entspricht nicht allen Werten aus den Sieblinien (insbesondere der größte Anteil der Fehlerschranke liegt über dem maximalen Wert d_{max})
Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	- ist vergleichbar mit dem Ergebnis aus dem Herbst 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	- die Fehlerschranke enthält keinen Wert aus den Sieblinien - deutlich unterschiedlich zu den zwei ersten Terminen - eine Annahme über den Einfluss des Bewuchs auf den Durchfluss wurde notwendig für die Anwendung der Gleichung [36]
Herbst 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	- ist vergleichbar mit dem Ergebnis aus dem Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	- die Fehlerschranke enthält keinen Wert aus den Sieblinien - deutlich unterschiedlich zu den anderen Terminen - eine Annahme über den Einfluss des Bewuchses auf den Durchfluss wurde notwendig für die Anwendung der Gleichung [36]

Tabelle 17: Beschreibung der Ergebnisse der Rückrechnung von $ks_{\text{so}}^{(2)}$ unter der Annahmenkombination (2)

Die vier Ergebnisse aus den verschiedenen Messterminen unter der Annahmenkombination (2) weisen entgegen der Erwartung eine große Abweichung auf. Außerdem liefern alle Messtermine zu hohe Werte im Vergleich zu den Werten aus den Sieblinien. Die hier angenommenen Berechnungsansätze sind nicht befriedigend und werden weiter untersucht. Im folgenden Berechnungsvorgang wird deshalb bei der Definition von λ_{so} der Formbeiwert f eingeführt (Ansatz nach Schröder [SCHRÖDER, 1990]). Die Beeinflussung der Geometrie des Durchflussquerschnitts wird somit präziser berücksichtigt.

4.4.2.1.2.4. Dritter Berechnungsvorgang für die Rückrechnung von ks_{so}

Hier werden die Annahmen über die Position der rechten Trennfläche und die Definition des Wasserspiegelgefälles gleich wie beim der zweiten Berechnungsvorgang eingehalten. Lediglich die Definition von λ_{so} wird mit der Einführung des Formbeiwertes f geändert. Die vier Messtermine werden auch hier untersucht.

Annahmenkombination (3) für die Rückberechnung :

Die Annahmen für die Rückrechnung von $ks_{so}^{(3)}$ (Q1) sind somit :

- **für die Definition von λ_{so} :** $\frac{1}{\sqrt{\lambda_{so}}} = 2,035 \cdot \text{Log}\left(\frac{14,84 \cdot f \cdot Rhy_{ges}}{ks_{so}}\right)$ (Ansatz nach Schröder [SCHRÖDER, 1990])
- für die Definition des Wasserspiegelgefälles : J wird als mittleres Gefälle der Referenz-Strecke $R1$ angenommen und wird zwischen die Messstationen „06.53 “ und $RB1$ berechnet (entspricht der Annahme der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal)
- für die Position der rechten Trennfläche : Variante A (Trennfläche am Böschungsknick, s. Bild 34)

Rückrechnung von $ks_{so}^{(3)}$

Die Berechnungen mit der Annahmenkombination (3) der initialen Werte und der Fehlerschranken von $ks_{so}^{(3)}$ (H4-6), $ks_{so}^{(3)}$ (F5-4), $ks_{so}^{(3)}$ (F5-6) und $ks_{so}^{(3)}$ (H5-6) werden wie in den zwei vorhergehenden Fällen durchgeführt. Auch hier haben die Untersuchungen gezeigt, dass $ks_{so}^{(3)}$ für jeden Termin ein quasi-lineares Verhalten mit allen Parametern aufweist. Die Ergebnisse der Fehleruntersuchungen für $ks_{so}^{(3)}$ sind im Anhang 12 für jeden Messtermin zusammengefasst.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen :

Messtermin	Initialer Wert	Fehlerschranke
Herbst 2004/ $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{\text{so,init}}^{(3)}(\text{H4-6}) = 0,33 \text{ m}$	$0,25 \text{ m} \leq ks_{\text{so}}^{(3)}(\text{H4-6}) \leq 0,42 \text{ m}$
Frühjahr 2005/ $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{\text{so,init}}^{(3)}(\text{F5-4}) = 0,11 \text{ m}$	$0,08 \text{ m} \leq ks_{\text{so}}^{(3)}(\text{F5-4}) \leq 0,15 \text{ m}$
Frühjahr 2005/ $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{\text{so,init}}^{(3)}(\text{F5-6}) = 0,17 \text{ m}$	$0,12 \text{ m} \leq ks_{\text{so}}^{(3)}(\text{F5-6}) \leq 0,21 \text{ m}$
Herbst 2005/ $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{\text{so,init}}^{(3)}(\text{H5-6}) = 0,16 \text{ m}$	$0,11 \text{ m} \leq ks_{\text{so}}^{(3)}(\text{H5-6}) \leq 0,21 \text{ m}$

Tabelle 18 :aus den verschiedenen Messterminen ermittelte initiale Werte und Fehlerschranken von $ks_{\text{so}}^{(3)}$

Die aus den verschiedenen Messterminen ermittelten initialen Werte und Fehlerschranken von $ks_{\text{so}}^{(3)}$ sind in der Tabelle 18 zusammengestellt und im zweiten Punkt des Bild 42 auf Seite 86 dargestellt. Sie werden mit den Ergebnissen aus der Untersuchung des Einbaumaterials und den Ergebnissen aus der Annahmenkombination (2) verglichen. Die folgenden Schlussfolgerungen sind aus diesem Vergleich herauszuziehen:

Messtermin	Vorteil des ermittelten $ks_{\text{so}}^{(3)}$	Nachteil des ermittelten $ks_{\text{so}}^{(3)}$
Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$		- $ks_{\text{so}}^{(3)}(\text{H4-6})$ bleibt viel höher als die rückgerechneten $ks_{\text{so}}^{(3)}$ bei den drei anderen Terminen - die Fehlerschranke enthält immer noch keinen Wert aus den Sieblinien
Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	- Im Vergleich zu den anderen Terminen bei der Annahmekombination (3) und im Vergleich zu der Annahmenkombination (2) nähern sich die Werte besser aus den Sieblinien : $d_{90,\text{US}}$ und $d_{\text{m,D}}$ gehören zu der Fehlerschranke	- Der maximale Wert d_{max} bleibt von der Fehlerschranke überschritten
Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	- ist vergleichbar mit dem Ergebnis aus dem Herbst 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	- die Fehlerschranke enthält keinen Wert aus den Sieblinien - bleibt deutlich unterschiedlich zu den zwei ersten Terminen
Herbst 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	- ist vergleichbar mit dem Ergebnis aus dem Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	- die Fehlerschranke enthält keinen Wert aus den Sieblinien - deutlich unterschiedlich zu den anderen Terminen

Tabelle 19 : Beschreibung der Ergebnisse der Rückrechnung von $ks_{\text{so}}^{(3)}$ unter der Annahmenkombination (3)

Die Einführung des Formbeiwertes in der Definition von λ_{so} hat grundsätzlich erlaubt, kleinere Werte für jeden Termin zu bekommen. Diese kommen wiederum nahe an die Werte der Sieblinie heran. Bild 41 zeigt deutlich diese Formbeiwertwirkung. Die Anwendung des Formbeiwertes ist daher berechtigt.

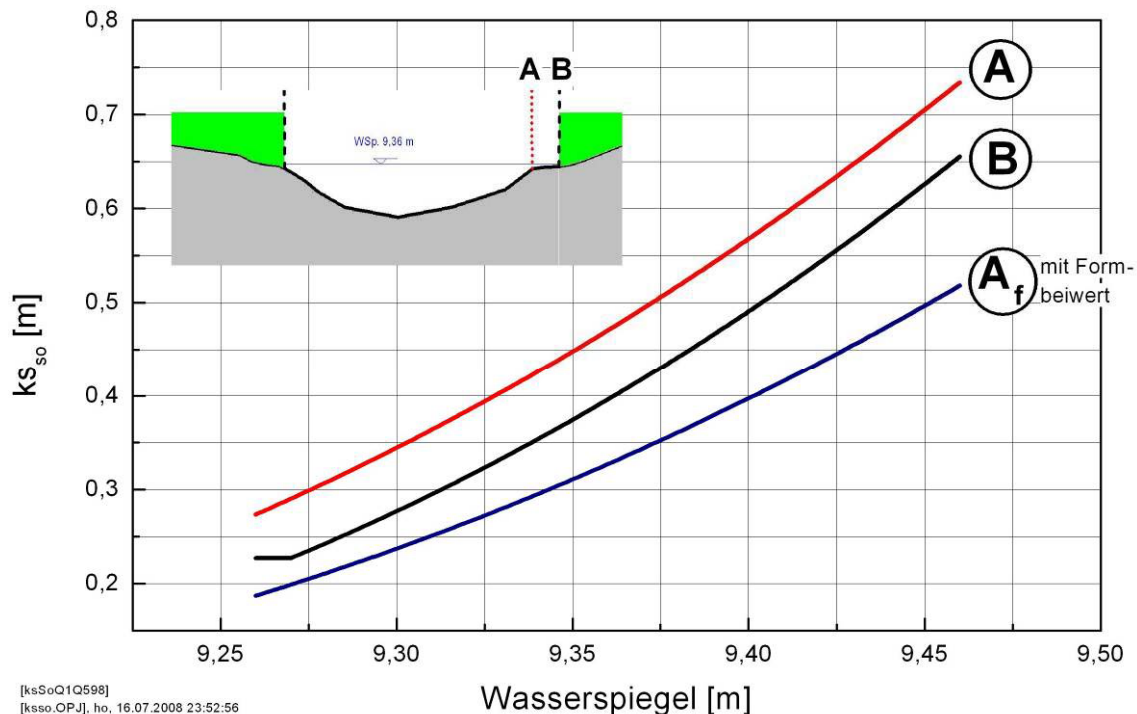


Bild 41 : Darstellung des Einflusses des Formbeiwertes auf ks_{so} mit dem Termin im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Die hier benutzten Annahmen liefern immer noch einen wesentlichen Unterschied zwischen den verschiedenen Terminen. Dies könnte auf die Definition des Gefälles zurückzuführen sein. Bis jetzt wurde das Gefälle als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert. Dies hat einen wenn auch kleinen so doch fehlerhaften Wert für den Eingangsparameter J zu Folge, da das Gefälle auf einer längeren Strecke berechnet wird. Aber auf der hydraulischen Ebene ist diese Definition ungenau. Da wir hier typischerweise einen strömenden Fließzustand haben, sollte das Gefälle mit einer Strecke flussabwärts von dem betrachteten Querschnitt Q1 berechnet werden.

Die oben ermittelten Ergebnisse ergeben einen kleinen Fehler aufgrund des Gefälles J_M (als mittleres Gefälle definiert) für den rückgerechneten ks_{so} -Wert im Vergleich zu den anderen wirkenden Parametern:

$$\left| \frac{\Delta ks_{so}}{ks_{so,init}} \right|_J \text{ liegt typischerweise zwischen 3 und 6 \% wenn } \left| \frac{\Delta ks_{so}}{ks_{so,init}} \right|_{Q_{gem}} \text{ bis 22\% beträgt.}$$

Es kann somit eine genauere Definition des Gefälles mit einem größeren Fehler gewählt werden, ohne dass eine wesentliche Fehlerzunahme erfolgt. Diese Annahme wird in dem folgenden Berechnungsvorgang untersucht.

4.4.2.1.2.5. Vierter Berechnungsvorgang für die Rückrechnung von ks_{so}

Hier werden die Annahmen über die Position der rechten Trennfläche und die Definition von λ_{so} wie oben bei dem dritten Berechnungsvorgang beibehalten. Die Definition des Gefälles wird geändert und über die Strecke zwischen dem Profil Q1 und der Messstation W2 flussabwärts berechnet. Die vier Messtermine werden auch hier untersucht. Die initialen Werte und die Fehlerschranken von $ks_{so}^{(4)}(H4-6)$, $ks_{so}^{(4)}(F5-4)$, $ks_{so}^{(4)}(F5-6)$ und $ks_{so}^{(4)}(H5-6)$ werden wie oben berechnet.

Annahmenkombination (4) für die Rückberechnung :

Die Annahmen für die Rückrechnung von $ks_{so}^{(4)}$ sind somit :

- für die Definition von λ_{so} : $\frac{1}{\sqrt{\lambda_{so}}} = 2,035 \cdot \text{Log} \left(\frac{14,84 \cdot f \cdot Rhy_{ges}}{ks_{so}} \right)$ (Ansatz nach Schröder [SCHRÖDER, 1990])
- **für die Definition des Wasserspiegelgefälles : J wird zwischen den Messstationen Q1 und W2 berechnet und J_H genannt (genauere Definition auf der hydraulischen Ebene)**
- für die Position der rechten Trennfläche : Variante A (Trennfläche am Böschungsknick, s. Bild 34)

Rückrechnung von $ks_{so}^{(4)}$

Die Berechnungen mit der Annahmenkombination (4) der initialen Werte und der Fehlerschranken von $ks_{so}^{(4)}(H4-6)$, $ks_{so}^{(4)}(F5-4)$, $ks_{so}^{(4)}(F5-6)$ und $ks_{so}^{(4)}(H5-6)$ werden wie in den drei vorhergehenden Fällen durchgeführt. Auch hier haben die Untersuchungen gezeigt, dass $ks_{so}^{(4)}$ für jeden Termin ein quasi-lineares Verhalten mit allen Parametern aufweist. Die Ergebnisse der Fehleruntersuchungen für $ks_{so}^{(4)}$ sind im Anhang 12 für jeden Messtermin zusammengefasst.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen :

Messtermin	Initialer Wert	Fehlerschranke
Herbst 2004/ $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{so,init}^{(4)}(H4-6) = 0,21 \text{ m}$	$0,14 \text{ m} \leq ks_{so}^{(4)}(H4-6) \leq 0,31 \text{ m}$
Frühjahr 2005/ $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{so,init}^{(4)}(F5-4) = 0,08 \text{ m}$	$0,05 \text{ m} \leq ks_{so}^{(4)}(F5-4) \leq 0,13 \text{ m}$
Frühjahr 2005/ $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{so,init}^{(4)}(F5-6) = 0,13 \text{ m}$	$0,08 \text{ m} \leq ks_{so}^{(4)}(F5-6) \leq 0,19 \text{ m}$
Herbst 2005/ $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	$ks_{so,init}^{(4)}(H5-6) = 0,12 \text{ m}$	$0,08 \text{ m} \leq ks_{so}^{(4)}(H5-6) \leq 0,18 \text{ m}$

Tabelle 20 : aus den verschiedenen Messterminen ermittelte initiale Werte und Fehlerschranken von $ks_{so}^{(4)}$

Die aus den verschiedenen Messterminen ermittelten initialen Werte und Fehlerschranken von $ks_{so}^{(3)}$ sind in der Tabelle 20 zusammengestellt und im dritten Punkt des Bild 42 auf Seite 86 dargestellt. Sie werden mit den Ergebnissen aus der Untersuchung des Einbaumaterials und den Ergebnissen aus der Annahmenkombinationen (2) und (3) verglichen. Die folgenden Schlussfolgerungen sind aus diesem Vergleich herauszuziehen:

Messtermin	Vorteil des ermittelten $ks_{so}^{(4)}$	Nachteil des ermittelten $ks_{so}^{(4)}$
Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	- der Unterschied zu den Ergebnissen der anderen Termine hat sich verringert	- $ks_{so}^{(4)}(H4-6)$ bleibt deutlich höher als die rückgerechneten $ks_{so}^{(4)}$ bei den drei anderen Terminen - die Fehlerschranke enthält immer noch keinen Wert aus den Sieblinien
Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	entspricht am besten den Werten aus den Sieblinien : - $d_{90,US}$ und $d_{m,D}$ gehören zu der Fehlerschranke - der maximale Wert d_{max} wird von der Fehlerschranke nicht überschritten	
Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$	- ist vergleichbar mit dem Ergebnis aus dem Herbst 2005 bei $Q_{nom} = 6$ m^3/s - $d_{90,US}$ und $d_{m,D}$ gehören zu der Fehlerschranke	- der maximale Wert d_{max} wird von der Fehlerschranke überschritten
Herbst 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	- ist vergleichbar mit dem Ergebnis aus dem Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 6$ m^3/s - $d_{90,US}$ und $d_{m,D}$ gehören zu der Fehlerschranke	- der maximale Wert d_{max} wird von der Fehlerschranke überschritten

Tabelle 21 : Beschreibung der Ergebnisse der Rückrechnung von $ks_{so}^{(4)}$
unter der Annahmenkombination (4)

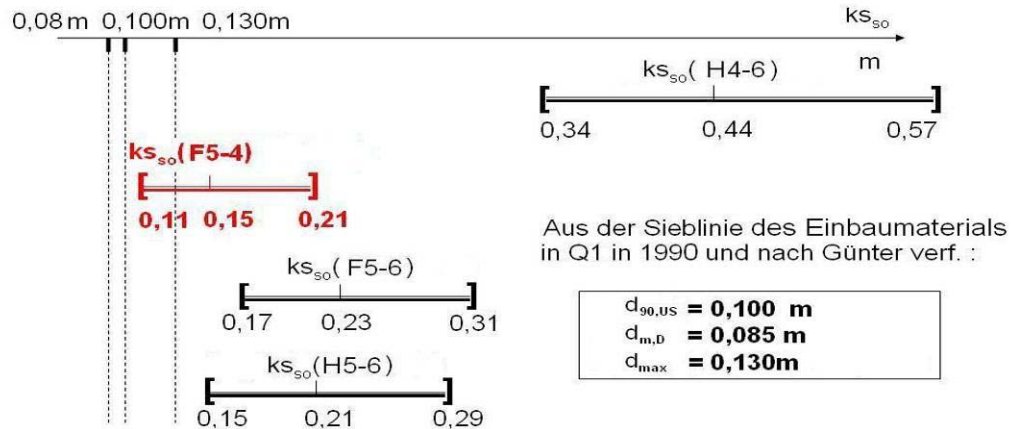
Zusätzlich mit der Einführung des Formbeiwertes in der Definition von λ_{so} hat die hier genauer angewendete Definition des Wasserspiegelgefälles erlaubt, eindeutig bessere Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Annahmenkombinationen (1), (2) und (3) zu ermitteln. Die Bestimmung von ks_{so} mit den Messergebnissen aus dem Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ liefert tatsächlich eine Fehlerschranke, die mit den Ergebnissen der Sieblinien sehr gut zusammenpasst.

Aber es gibt allerdings noch einen größeren Unterschied – hier zwar abgemindert – zwischen den ermittelten Werten aus den verschiedenen Messterminen.

Vergleich der verschiedenen ermittelten ks_{so}

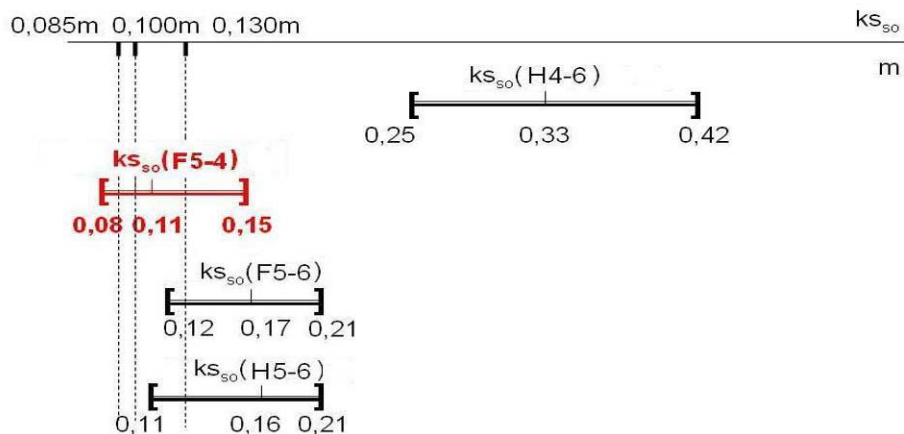
■ Annahmenkombination (2) :

- Rechter Trennfläche am Böschungsknick positioniert (Variante A)
- $1/\lambda_{so}^2 = 2 \cdot \text{Log}(14,84 \cdot Rhy_{ges}/ks_{so})$
- J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert : zw. 06.53 und RB1 berechnet



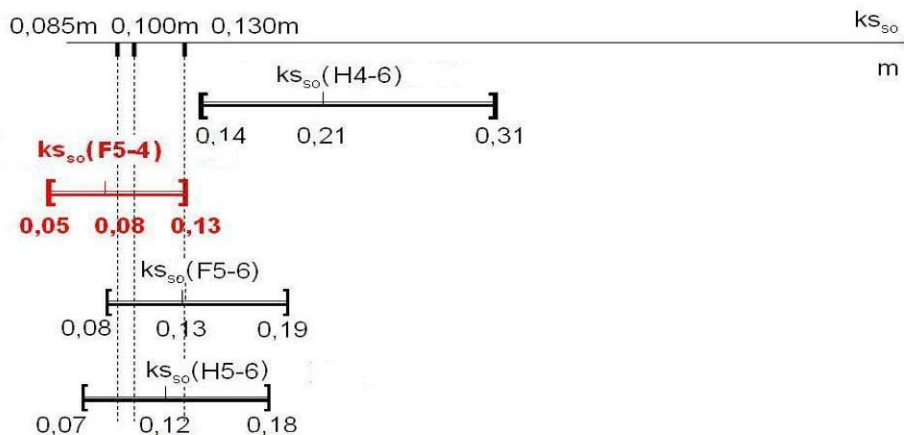
■ Annahmenkombination (3) :

- Rechter Trennfläche am Knick der Gelände positioniert (Variante A)
- $1/\lambda_{so}^2 = 2,035 \cdot \text{Log}(14,84 \cdot f \cdot Rhy_{ges}/ks_{so})$
- J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert : zw. 06.53 und RB1 berechnet



■ Annahmenkombination (4) :

- Rechter Trennfläche am Knick der Gelände positioniert (Variante A)
- $1/\lambda_{so}^2 = 2,035 \cdot \text{Log}(14,84 \cdot f \cdot Rhy_{ges}/ks_{so})$
- J als Gefälle zw. Q1 und W2 berechnet

Bild 42 : Vergleich der ermittelten ks_{so} anhand der verschiedenen Messtermine und Annahmenkombinationen

4.4.2.1.2.6. Schlussfolgerungen : Bestimmung von ks_{so}

Die befriedigenden Ergebnisse der Annahmenkombination (4) legen fest, dass das Wasserspiegelgefälle und die Profilgeometrie wichtige und zugleich sensible Parameter für die Bestimmung der äquivalenten Sandrauheit der Sohle durch Rückrechnung sind. Die benutzten Ansätze sollen auf die besten Präzisionen für diese Parameter hinweisen :

- das Gefälle muss möglichst genau erfasst werden. Es muss flussabwärts des untersuchten Profils definiert werden und sollte eventuell mit einer verfeinerten Messtechnik (z.B. Differentialdruckmessgerät) ermittelt werden.
- der Formbeiwert f muss bei der Definition des Widerstandsbeiwertes der Sohle λ_{so} angewendet werden.

Was die bleibenden unvernachlässigbaren Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus den verschiedenen Messterminen betrifft, können die folgenden Argumente berücksichtigt werden:

- Der Unterschied zwischen den Ergebnissen aus dem Herbst 2004 und dem Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ ist auf den Einfluss der einhängenden Äste, die im Herbst 2004 vorhanden sind, und deren Einfluss in den Rückrechnungen nicht berücksichtigt werden, zurückzuführen. Ein Vergleich der Eingangsparameter der Messtermine im Herbst 2004 und im Herbst 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ verdeutlicht dies (s. Tabelle 22).

Parameter	Herbst 2004 $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	Herbst 2005 $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	Vergleich
$Q_{gem} [\text{m}^3/\text{s}]$	5,98	6,03	$Q_{gem}(H4-6) \approx Q_{gem}(H4-6)$
$J_M [\text{‰}]$	0,314	0,314	$J_M(H4-6) \approx J_M(H4-6)$
Wsp [m]	9,36	9,27	$Wsp(H4-6) - Wsp(H4-6) = 9\text{cm}$

Tabelle 22 : Vergleich der Eingangsparameter aus den Messterminen des Herbstes 2004 und des Herbstes 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Es gibt einen deutlichen Unterschied zwischen den Wasserspiegelhöhen während die beiden anderen Parameter gleich sind. Dies kann nur auf den Einfluss des zusätzlichen Fließwiderstandes der einhängenden Äste im Herbst 2004 zurückgeführt werden, da deutlich nachgewiesen wurde, dass der Uferbewuchs (Stammenden selbst) keinen Einfluss hat (s. Gleichung [40]). Im Herbst 2004 ist die Rauheit der Sohle nicht die einzige wirkende Rauheit, so dass dieser Termin eigentlich nicht für die Bestimmung von ks_{so} benutzt werden kann.

- Der Unterschied zwischen den Messterminen aus dem Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ und dem Frühjahr und dem Herbst 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt sich nicht so deutlich. Im Frühjahr und im Herbst 2005 gibt es nämlich keine einhängende Äste mehr (Pflegemaßnahmen wurden im Winter 2004/2005 durchgeführt) und wir haben:

$$\begin{cases} h_{T,li}(F5-6) = 0,05 \text{ m} \\ h_{T,re}(F5-6) = 0,06 \text{ m} \end{cases} \quad \text{und} \quad \begin{cases} h_{T,li}(H5-6) = 0,06 \text{ m} \\ h_{T,re}(H5-6) = 0,07 \text{ m} \end{cases}$$

so dass :

$$\frac{h_T(F5-6)}{ks_{so}(F5-6)} \leq 1 \quad \text{und} \quad \frac{h_T(H5-6)}{ks_{so}(H5-6)} \leq 1$$

was nachweist, dass der Fließwiderstand der beiden Uferbereiche sich auf die bloße Wandungsrauheit reduziert. (es gibt keinen Impulsaustausch mehr.) Die Begründung dieses Unterschiedes müsste in einer weiterführenden Analyse gesucht werden, die auch die anderen Messprofile einschließt.

Die letzte untersuchte Annahmenkombination (4) liefert daher die besten Ergebnisse im Vergleich zu der Untersuchung des Einbaumaterials. Aber die Termine im Herbst 2004, im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Herbst 2005 liefern allerdings noch zu hohe Werte. Diese sind nicht plausibel und dürfen daher nicht zur Abschätzung von ks_{so} herangezogen werden. Es wird somit für die weiteren Berechnungen die folgende Annahme für die Bestimmung von ks_{so} gemacht:

$$ks_{so} = ks_{so}^{(4)}(F5-4)$$

d.h.:

[43] $ks_{so,init} = 0,08 \text{ m}$ $0,05 \text{ m} \leq ks_{so} \leq 0,13 \text{ m}$

Aus der Sieblinie entsprechen außerdem diese Werte den folgenden typischen Durchmessern:

$$0,05 \text{ m} \approx d_{60,US}$$

$$0,08 \text{ m} \approx d_{80,US}$$

$$0,13 \text{ m} \approx d_{max}$$

Rechtfertigung der Größenordnung des Fehlers für ks_{so}

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft gibt auch in ihrem Forschungsbericht aus dem Jahr 1987 den allgemein möglichen prozentualen Fehler f_k bei der Ermittlung der äquivalenten Rauheiten aus Naturmessdaten in Abhängigkeit vom Widerstandsbeiwert an.

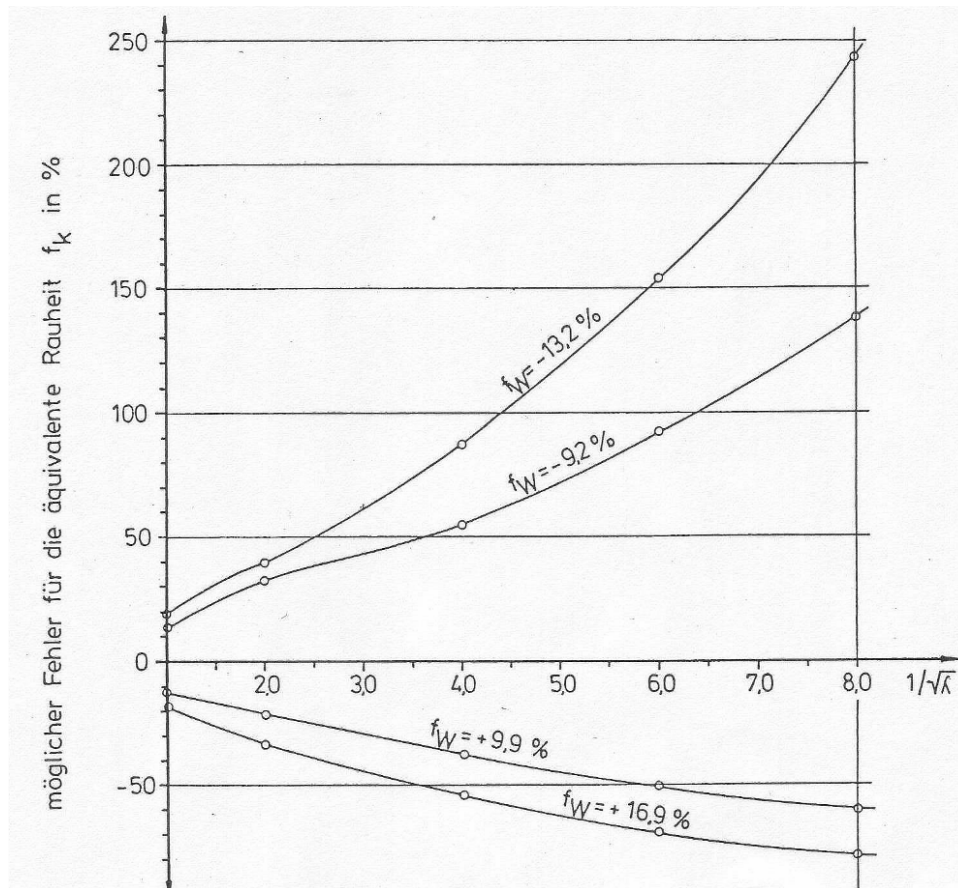


Bild 43 : Möglicher prozentualer Fehler bei der Ermittlung der äquivalenten Rauheiten aus Naturmessdaten in Abhängigkeit vom Widerstandsbeiwert [DFG, 1987]

Aus der Graphik der DFG (s. Bild 43) wird die Fehlergröße f_k für einen Fehler für das Gefälle $f_l = 5\%$ (entspricht dem Fehler für den Widerstandsbeiwert $1/\sqrt{\lambda}$ $f_W = +9,9\%$ / $-9,2\%$ im Bild 43) und $1/\sqrt{\lambda_{so}} = 0,4$ (entspricht $ks_{so} = 0,08$ m bei $Q_{nom} = 4$ m³/s) gelesen:

[44]	$f_k(1/\sqrt{\lambda_{so}} = 0,4) = +55\% / -40\%$
------	--

Und hier wird bestimmt (aus Gleichung [43]):

$$ks_{so,min} = 0,05 \text{ m} = ks_{so,init} - 43\%$$

$$ks_{so,max} = 0,13 \text{ m} = ks_{so,init} + 63\%$$

Was ziemlich gut der Größenordnung der Gleichung [44] entspricht.

4.4.2.2. Bestimmung der Bewuchsparemeter

Bei Q1 an der rechten Böschung gibt es einen dichten Weidenbestand (*Salix sp.*) mit relativ großen Stammdurchmessern. An der linken Böschung ist ein heckenförmiger Bewuchs aus verschiedenen Sträuchern (*Crataegus monogyna* und *Cornus sanguinea*) vorhanden.

4.4.2.2.1. Bestimmung anhand von Messungen vor Ort

Im Rahmen der Diplomarbeit von Manuel CAYUELA (2005) wurden die Bewuchsparemeter der beiden Böschungen anhand von Messungen vor Ort bestimmt. Diese wurden durch Zählen der Stämme und Messung der Durchmesser in ausgewählten Probeflächen je nach Profil und Böschung ermittelt (s. Bild 44).



Bild 44 : Beispiel einer Probefläche bei dem Profil Q1 in Jahre 2005 für die Bestimmung der Bewuchsparemeter

Um eine erste Idee des Einflusses der Stammdurchmesser und der Bewuchsdichte auf $k_{St,ges}$ zu untersuchen, wurden an der rechten Böschung die Bewuchsparemeter einerseits nur mit Berücksichtigung der größeren Stämme und andererseits mit Berücksichtigung von allen Stämmen ermittelt.

Diese Untersuchungen haben die Werten in der Tabelle 23 geliefert.

Linke Böschung	Rechte Böschung	
	Größere Stämme	Alle Stämme
$a_{x,li} = a_{y,li} = 0,245 \text{ m}$	$a_{x,re} = a_{y,re} = 0,840 \text{ m}$	$a_{x,re} = a_{y,re} = 0,620 \text{ m}$
$d_{p,li} = 0,013 \text{ m}$	$d_{p,re} = 0,096 \text{ m}$	$d_{p,re} = 0,053 \text{ m}$

Tabelle 23 : gemessene Bewuchsparemeter im Profil Q1 [CAYUELA, 2005]

Die ersten Berechnungen, die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass es keinen wesentlichen Unterschied macht, wenn man nur die größeren Stämme berücksichtigt. Die Werte der Bewuchssparameter bei größeren Stämmen werden somit als initiale Werte genommen.

4.4.2.2.2. Empfehlungen aus der Literatur

Außerdem stehen in der Literatur Empfehlungswerte zur Verfügung. RITTERBACH (1991) schlägt vor:

$$\begin{aligned} \text{Weiden: } 0,15 \text{ m} \leq a_{x,y} \leq 0,30 \text{ m} - 0,02 \text{ m} \leq d_p \leq 0,05 \text{ m} \\ \text{Sträucher: } 0,60 \text{ m} \leq a_{x,y} \leq 1 \text{ m} - 0,04 \text{ m} \leq d_p \leq 0,07 \text{ m} \end{aligned}$$

Was CAYUELA's Messungen gut eintrifft.

4.4.2.2.3. Bestimmung des Vertrauensbereiches für die Bewuchssparameter

Folgende Einflüsse wurden berücksichtigt, um den Vertrauensbereich der Bewuchssparameter zu bestimmen:

- Die Größenordnung von den o.a. Empfehlungen dient als Basis für den Vertrauensbereich.
- Die aus allen Stämmen berechneten Bewuchssparameter müssen zu den Vertrauensbereichen der Bewuchssparameter bei der rechten Böschung gehören.
- Der intermediäre Bewuchssparameter $B = \left(\frac{a_x}{d_p} - 1 \right)^2 \cdot \left(\frac{a_y}{d_p} \right)$ muss für den gesamten Vertrauensbereich unter 6000 bleiben. Es wurde tatsächlich vor Ort beobachtet, dass den Bewuchs dicht ist (s. Abschnitt 3.2.3).

Anhand dieser Betrachtungen kann die Fehlergröße wie folgt begrenzt werden:

[45]	$\left \frac{\Delta a_{x,y}}{a_{x,y}} \right = \left \frac{\Delta d_p}{d_p} \right \approx 20\%$
------	--

Die Tatsache, dass man nur die größeren Stämme zu berücksichtigen braucht, ohne dass es wesentliche Änderungen in der Berechnung für den gesamten Strickler-Beiwert $k_{St,ges}$ bzw. dem gemessenen Durchfluss Q_{ber} mit sich bringt, beweist, dass die Auslichtung bzw. Abstockung während der Pflegemaßnahmen oder das Wachstum innerhalb einer Jahreszeit vernachlässigt werden darf. Man darf daher innerhalb des Zeitraums unserer Untersuchungen die Bewuchssparameter unabhängig von der Zeit und fix für das betrachtete Profil berücksichtigen.

4.4.3. Berechnung der gesamten Strickler-Beiwerte und der berechneten Durchflüsse im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

Um den gesamten Strickler-Beiwert $k_{\text{St,ges}}$ und den Durchfluss Q_{ber} zu ermitteln, gibt es, wie im Abschnitt 3.2.3 beschrieben, verschiedene Methoden, welche die Berechnung der Trennflächenrauheiten und ein Verfahren für die Überlagerung der verschiedenen Rauheiten des Querschnitts kombinieren.

Zur Quantifizierung der fiktiven Trennflächenrauheiten wurde das Mertens-Verfahren [DWVK, 1991] und seine Ergänzung nach SPECHT (2002) herangezogen. Die ausschließende Überlagerung der Einzelrauheiten zu einer Gesamtrauheit erfolgt nach den Empfehlungen der DVWK (1991), sowie nach INDLEKOFER (2003 und 2005).

Es wurden zuerst die initialen Werten im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005 berechnet und mit den zu erreichenden rückgerechneten Werten aus Abschnitt 4.4.1.4 verglichen. Dann wurde eine vertiefte Untersuchung der Ergebnisse vom Frühjahr 2005 durch eine Bestimmung der Fehlerschranken des berechneten gesamten Strickler-Beiwertes $k_{\text{St,ges}}(\text{F5-10})$ und des berechneten Durchflusses $Q_{\text{ber}}(\text{F5-10})$ durchgeführt.

4.4.3.1. Berechnung der initialen Werte mit verschiedenen Methoden

4.4.3.1.1. Berechnung der initialen Werte des gesamten Strickler-Beiwertes $k_{\text{St,ges,init}}(\text{H4-10})$ und des Durchflusses $Q_{\text{ber,init}}(\text{H4-10})$ im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

Dafür sind wesentlich die Eingangsparameter bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ im Herbst 2004. Diese wurden mit verschiedenen Berechnungsmethoden ausgewertet und die Ergebnisse mit der Fehlerschranke von $k_{\text{St,ges}}^*(\text{H4-10})$ aus den Rückrechnungen verglichen.

4.4.3.1.1.1. Initiale Werte der Eingangsparameter im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

Im Detail handelt es sich um die folgenden Eingangsparameter (s. Abschnitt 4.4.2):

- das Wasserspiegelgefälle $J(\text{H4-10})$ (notwendig für die Überlagerung nach DVWK und für die Berechnung von Q_{ber} s. Anfang des Abschnitts 4.4.2 Seite 64)
- die Wasserspiegelhöhe $W_{\text{sp}}(\text{H4-10})$
- die Trennflächenfußpunkte Tf_{li} und Tf_{re}
- die Profilgeometrie
- die äquivalente Sandrauheit ks_{so}
- die Bewuchsparameter.

Sie sind in der folgenden Tabelle 24 zusammengefasst. Als Erstes wird hier das Wasserspiegelgefälle als mittleres Gefälle der Strecke R1 berücksichtigt.

$J(\text{H4-10})$, $W_{\text{sp}}(\text{H4-10})$, Tf_{li} Tf_{re} und die Profilgeometrie wurden schon bei der Rückrechnung von $k_{\text{St,ges}}^*(\text{H4-10})$ benutzt (s. Abschnitt 4.4.1.2.1.1). ks_{so} wurde im Abschnitt 4.4.2.1.2.6 (Gleichung [43]) ermittelt und die Bewuchsparameter im Abschnitt 4.4.2.2.1 (Tabelle 23) zusammengefasst.

Parameter Im Herbst 2004 $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$	J [‰]	Wsp [m]	$T_{f_{li}}$ [m]	$T_{f_{re}}$ [m]	Bewuchsparameter [m]				$k_{s_{so}}$ [m]	Profil- Geometrie
					$a_{x,li} =$ $a_{y,li}$ [m]	$d_{p,li}$ [m]	$a_{x,re} =$ $a_{y,re}$ [m]	$d_{p,re}$ [m]		
Initialer Wert	0,49	10,00	4,46	14,74	0,243	0,013	0,840	0,096	0,08	Laut Bild 22

Tabelle 24 : Initiale Werte der Eingangsparameter bei der Berechnung von $k_{St,ges}(H4-10)$ und $Q_{ber}(H4-10)$ im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.3.1.1.2. Berechnungen mit den verschiedenen Verfahren

Zunächst werden die Trennflächenrauheiten mit dem Mertens-Verfahren berechnet und die drei verschiedenen Überlagerungsmethoden wurden dann verglichen. Die Ergebnisse sind in den drei ersten Spalten der Tabelle 25 zusammengefasst. Aus diesen ersten Ergebnissen kann gefolgert werden, dass die verschiedenen Überlagerungsmethoden zu keinem wesentlichen Unterschied führen. Sie sind anscheinend äquivalent. Für die weitere Berechnung mit der Ermittlung der Trennflächenrauheit anhand des Specht-Verfahrens wird deshalb nur eine Überlagerungsmethode (laut Empfehlungen nach DVWK-91) benutzt. Das Ergebnis befindet sich in der letzten Spalte der Tabelle 25.

k_T - Berechnungs- verfahren	MERTENS Verfahren			SPECHT Verfahren
Überlagerungs- methoden	DVWK-91	INDLEKOFR 2003	INDLEKOFR 2005	DVWK-91
$k_{T,li}$ [m]	1,13			4,79
$k_{T,re}$ [m]	1,71			6,59
$k_{St,ges}$ [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]	36	36	36	32
Q_{ber} [m^3/s]	17,4	17,4	17,5	15,3

Tabelle 25 : Zusammenfassung der berechneten $k_{St,ges}$ und Q_{ber} im Herbst 2004 für $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.3.1.1.3. Schlussfolgerungen : Vergleich mit den zu erreichenden Werten für den Herbst 2004

Diese berechneten Werte sind mit dem rückgerechneten $k_{St,ges}^*(H4-10)$ und dem gemessenen Durchfluss $Q_{gem}(H4-10)$ im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ zu vergleichen. Als Erinnerung wurde ermittelt (s. Gleichung [31] im Abschnitt 4.4.1.2.2.2 und Tabelle 6 im Abschnitt 4.4.1.2.1.3) :

$$18 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \leq k_{St,ges}^*(H4-10) \leq 21 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$8,95 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{gem}(H4-10) \leq 9,89 \text{ m}^3/\text{s}$$

Die berechneten Werte sind eindeutig viel höher als die zu erreichenden Werte. Eine weitere Untersuchung dieser Werte aus dem Herbst 2004 mit einer Bestimmung der Fehlerschranken für $k_{St,ges}(H4-10)$ und $Q_{ber}(H4-10)$ würde keine weitere Information liefern. Diese zu hohen Werte wären auch hier darauf zurückzuführen, dass in der Umgebung von Q1 im Russbach im Herbst 2004 einhängende Äste vorhanden sind, deren Beeinflussung in den

Berechnungen von $k_{St,ges}(H4-10)$ und $Q_{ber}(H4-10)$ nicht berücksichtigt wird und anscheinend auch nicht zu vernachlässigen sind.

4.4.3.1.2. Berechnung der initialen Werte des gesamten Strickler-Beiwertes $k_{St,ges,init}(F05-10)$ und des Durchflusses $Q_{ber,init}(F5-10)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

Es wurden ähnlich wie im Herbst 2004 die initialen Werte der Parameter wiederholt und die Berechnungen mit denselben Methoden durchgeführt.

4.4.3.1.2.1. Initiale Werte der Eingangsparameter im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

Die Eingangsparameter $J(F5-10)$ und $Wsp(F5-10)$ wurden auch schon bei der Rückrechnung von $k_{St,ges}^*(F5-10)$ benutzt (s. Tabelle 9 Abschnitt 4.4.1.3.1). Die anderen Parameter bleiben ähnlich wie im Herbst 2004.

Parameter Im Frühjahr 2005 $Q_{nom}=10 \text{ m}^3/\text{s}$	J [%o]	Wsp [m]	Tf_{li} [m]	Tf_{re} [m]	Bewuchsparameter [m]				ks_{so} [m]	Profil- Geometrie
					$a_{x,li}=a_{y,li}$ [m]	$d_{p,li}$ [m]	$a_{x,re}=a_{y,re}$ [m]	$d_{p,re}$ [m]		
Initialer Wert	0,36	9,76	4,46	14,74	0,243	0,013	0,840	0,096	0,08	Laut Bild 22

Tabelle 26 : Initiale Werte der Eingangsparameter bei der Berechnung von $k_{St,ges}(F5-10)$ und $Q_{ber}(F5-10)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.3.1.2.2. Berechnungen mit den verschiedenen Verfahren

Die Berechnungen wurden ähnlich wie mit den Daten aus dem Herbst 2004 durchgeführt. Die verschiedenen Überlagerungsmethoden liefern logischerweise auch keinen wesentlichen Unterschied.

k_T - Berechnungs- verfahren	MERTENS Verfahren			SPECHT Verfahren
Überlagerungs- methoden	DVWK-91	INDLEKOFER 2003	INDLEKOFER 2005	DVWK-91
$k_{T,li}$ [m]	0,77			4,35
$k_{T,re}$ [m]	1,23			6,22
$k_{St,ges}$ [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]	38	37	38	33
Q_{ber} [m^3/s]	12,4	12,2	12,4	10,7

Tabelle 27 : Zusammenfassung der berechneten $k_{St,ges}$ und Q_{ber} im Frühjahr 2005 für $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.3.1.2.3. Schlussfolgerungen : Vergleich mit den zu erreichenden Werten für das Frühjahr 2005

Diese berechneten Werte sind mit dem rückgerechneten $k_{St,ges}^*(F5-10)$ und dem gemessenen Durchfluss $Q_{gem}(F5-10)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ zu vergleichen. Als Erinnerung wurde ermittelt (s. Gleichung [33] im Abschnitt 4.4.1.3.2.2 und die Tabelle 9 im Abschnitt 4.4.1.3.1) :

$$28 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \leq k_{St,ges}^*(F5-10) \leq 33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$9,50 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{gem}(F5-10) \leq 10,50 \text{ m}^3/\text{s}$$

Die berechneten Werte passen sich hier besser an die zu erreichenden Werte an. Mit dem Mertens-Verfahren bleiben trotzdem der Strickler-Beiwert und der Durchfluss noch deutlich über der oberen Grenze der Vertrauensbereiche von $k_{St,ges}^*(F5-10)$ und $Q_{gem}(F5-10)$. Die Benutzung des Specht-Verfahrens ergibt a priori ein besseres Ergebnis. Eine weitere Untersuchung dieser Ergebnisse mit der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse der verschiedenen angewandten Methoden und die Bestimmung der Fehlerschranken von $k_{St,ges}(F5-10)$ und $Q_{ber}(F5-10)$ erlaubt, diese Schlussfolgerungen zu bestätigen.

4.4.3.2. Ermittlung der Fehlerschranken des berechneten Strickler-Beiwertes $k_{St,ges}(F5-10)$ und des berechneten Durchflusses $Q_{ber}(F5-10)$ für die verschiedenen Berechnungsmethoden

Ähnlich wie bei den vorangegangenen Bestimmungen von Fehlerschranken wurde jeweils ein Parameter in seinem Vertrauensbereich variiert, während die anderen mit dem initialen Wert fix gehalten wurden. Das Verhältnis von $k_{St,ges}(F5-10)$ und $Q_{ber}(F5-10)$ in Abhängigkeit von jedem Parameter und ihre Vertrauensbereiche wurden mit dieser Methode (Sensitivitätsanalyse) für jede Berechnungsmethode untersucht. Diese ermittelten Fehlerschranken wurden dann mit der Fehlerschranke von $k_{St,ges}^*(F5-10)$ aus den Rückrechnungen verglichen.

4.4.3.2.1. Vertrauensbereich der Eingangsparameter

Die Vertrauensbereiche des Wasserspiegels $Wsp(F5-10)$, der Trennflächenfußpunkte Tf_{li} und Tf_{re} und des Gefälles $J(F5-10)$ wurden schon bei der Rückrechnung von $k_{St,ges}^*(F5-10)$ benutzt (s. Tabelle 9 Abschnitt 4.4.1.3.1). Die Werte der äquivalenten Sandrauheit der Sohle ks_{so} und der Bewuchssparameter sind dieselben wie bei der Berechnung von $k_{St,ges}(H4-10)$. Sie sind in der folgenden Tabelle 28 zusammengefasst.

Parameter in Q1 im Frühjahr 2005 $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$		initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich
Bewuchsparameter [m]	$a_{x,li} = a_{y,li}$	0,245	+/- 20%	[0,200 – 0,270]
	$d_{p,li}$	0,013		[0,011 – 0,016]
	$a_{x,re} = a_{y,re}$	0,840		[0,670 – 1,010]
	$d_{p,re}$	0,096		[0,080 – 0,110]
Wsp [m]		9,76	+/- 5 cm	[9,71 – 9,81]
Tf [m der linken Böschung entfernt]	Tf _{li}	4,46	- 0,73 m	[3,73 – 4,46]
	Tf _{re}	14,77	- 1 m	[13,77-14,77]
k _{Sso} [m]		0,08	laut Rückrechnungen, ca. +/- 50 %	[0,05 – 0,13]
J [‰]		0,360	+/- 2 %	[0,353 – 0,367]

Tabelle 28 : Vertrauensbereich der Eingangsparameter für die Berechnung von $k_{\text{St,ges}}$ (F5-10) und Q_{ber} (F5-10) im Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.3.2.2. Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Berechnungsmethoden des gesamten Strickler-Beiwertes $k_{\text{St,ges}}$ und des Durchflusses Q_{ber}

Das Verhalten der beiden Größen wurde durch die Berechnung von $k_{\text{St,ges}}$ und Q_{ber} für verschiedene Werte der Parameter in ihrem Vertrauensbereich untersucht. Ihre Fehlerschranken wurden durch die ungünstigsten Kombinationen der verschiedenen Parameter ermittelt.

Um die Beeinflussung der den Parametern innewohnenden Fehler gänzlich zu erfassen, wird die Untersuchung auf das Verhalten der fiktiven Trennflächenrauheiten $k_{T,li}$ und $k_{T,re}$ ausgeweitet.

Um eine Größenordnung der Beeinflussung von jedem Parameter zu bekommen (s. Bild 45), wurde jeweils ein prozentueller Teilfehler des jeweiligen Parameters für jede Größe $k_{T,li}$, $k_{T,re}$, $k_{\text{St,ges}}$ und Q_{ber} berechnet, selbst wenn das Verhalten der Größe mit dem betrachteten Parameter streng genommen nicht linear angenommen werden kann.

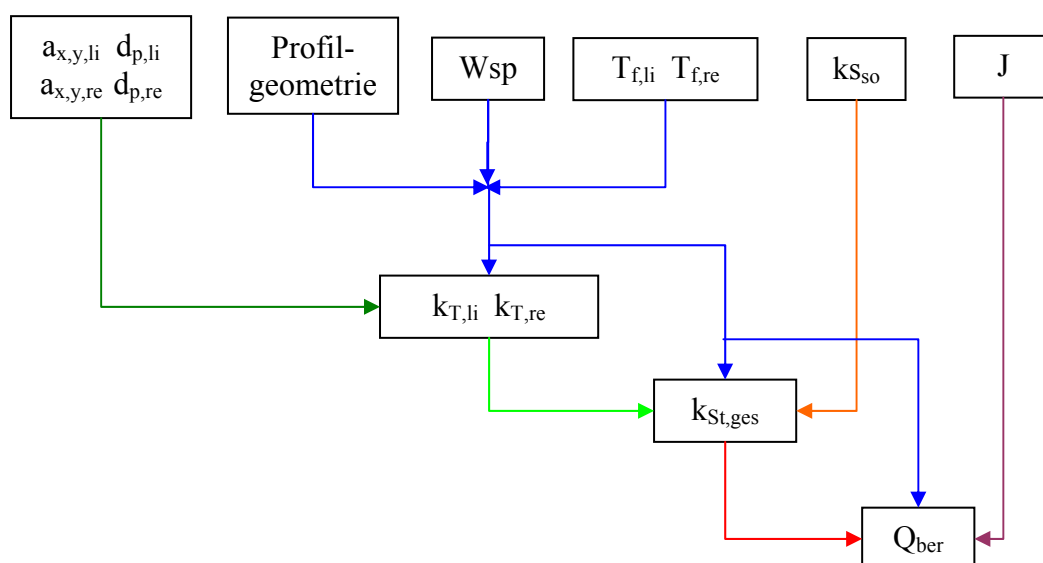


Bild 45 : Beziehungen zwischen den Parametern und den berechneten Größen

4.4.3.2.2.1. Analyse der Methode : Trennflächenrauheiten laut Mertens-Verfahren und Überlagerung nach DVWK-91

Die Parametersensitivität der Methode für die Berechnung von $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ anhand des Mertens-Verfahrens und der Überlagerung nach DVWK (1991) wurde hier untersucht.

$k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$: direkt berechneter gesamter Strickler-Beiwert im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ anhand des Mertens-Verfahrens und der Überlagerung nach DVWK-91

$Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$: berechneter Durchfluss im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ anhand des Mertens-Verfahrens und der Überlagerung nach DVWK-91

- Fehler aufgrund der Bewuchsparameter

Der 20%ige Fehler für die Bewuchsparameter $a_{x,y,li}$ und $d_{p,li}$ bzw. $a_{x,y,re}$ und $d_{p,re}$ führt mit dem Mertens-Verfahren zu den folgenden prozentuellen Fehlern bei der Ermittlung der beiden fiktiven Trennflächenrauheiten :

$$[46] \quad \left| \frac{\Delta k_{T,li}^{(m)}(F5-10)}{k_{T,li,init}^{(m)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,li}; d_{p,li}} \approx 48\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta k_{T,re}^{(m)}(F5-10)}{k_{T,re,init}^{(m)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,re}; d_{p,re}} \approx 13\%$$

Der deutliche Unterschied zwischen den resultierenden Fehlern für die beiden Seiten wäre darauf zurückzuführen, dass bei dem Mertens-Verfahren die beiden Böschungen nicht ähnlich behandelt werden : Die Breite $b_{III,li}$ der Beeinflussungsfläche der linken Böschung wird iteriert, während die Breite $b_{III,re}$ direkt berechnet wird. (s. Abschnitt 3.2.3.1.2.1, Struktogramm des Mertens-Verfahrens Bild 14)

Die Wirkung von jedem einzelnen Bewuchsparameter auf $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ bzw. $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ ist im

Bild 46 bzw. im Bild 47 mit den verschiedenen blauen Kurven dargestellt. Die ungünstigste Kombination der Fehler für die vier Bewuchsparameter führen zu dem folgenden maximalen Fehler bei der Ermittlung von $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$:

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)}{k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,li}; a_{x,y,re}; d_{p,li}; d_{p,re}} = \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)}{Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,li}; a_{x,y,re}; d_{p,li}; d_{p,re}} \approx 1\%$$

Die beiden Fehler für $k_{St,ges}$ und Q_{ber} sind gleich, weil die Bewuchsparameter nur über $k_{St,ges}$ auf Q_{ber} wirken (s. Bild 45).

Es kann daraus geschlossen werden, dass der Einfluss der Bewuchsparameter mit dem Mertens-Verfahren in Kombination mit der Überlagerung nach DVWK (1991) auf $k_{St,ges}$ bzw. Q_{ber} sehr gering ist, auch wenn sie sehr groß auf die fiktiven Trennflächenrauheiten wirken. Die Umfänge $h_{T,li}(H5-10)$ und $h_{T,re}(H5-10)$, bei denen diese Rauheiten wirken, sind nämlich klein im Vergleich zu dem benetzten Umfang der Sohle $u_{so}(H5-10)$:

$$\begin{aligned} h_{T,li,init}(H5-10) &= 0,55\text{m} \ll u_{so}(H5-10) = 10,96\text{m} \\ h_{T,re,init}(H5-10) &= 0,49\text{m} \ll u_{so}(H5-10) = 10,96\text{m} \end{aligned}$$

Die kleine Beeinflussung der Bewuchsparameter auf $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ bestätigt außerdem die im Abschnitt 4.4.2.2.3 betrachtete Annahme über die zeitliche Unabhängigkeit der Bewuchsparameter.

- Fehler aufgrund des Wasserspiegels Wsp

Der +/- 1 cm Fehler für den Wasserspiegel führt mit dem Mertens-Verfahren zu den folgenden prozentuellen Fehlern bei der Ermittlung der beiden fiktiven Trennflächenrauheiten:

$$\left| \frac{\Delta k_{T,li}^{(m)}(F5-10)}{k_{T,li,init}^{(m)}(F5-10)} \right|_{Wsp} \approx \left| \frac{\Delta k_{T,re}^{(m)}(F5-10)}{k_{T,re,init}^{(m)}(F5-10)} \right|_{Wsp} \approx 2\%$$

Der mögliche Fehler für Wsp wirkt wie folgt auf $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$:

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_{Wsp} \approx 0,2\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_{Wsp} \approx 1\%$$

Der Einfluss von Wsp auf $k_{st,ges}$ ist vernachlässigbar. Die Wirkung von Wsp auf $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ ist im Bild 47 mit der dunkelgelben Kurve dargestellt.

- Fehler aufgrund der Trennflächenfußpunkte

Die Unsicherheit auf die Position der linken Trennfläche kann nur eine mögliche Verschiebung dieser Trennfläche nach links sein (s. Abschnitt 4.4.1.2.1.2). Die maximale mögliche Verschiebung um 0,73 m führt mit dem Mertens-Verfahren zu einer minimalen linken fiktiven Trennflächenrauheit. Die Abminderung beträgt 26% :

$$k_{T,li}^{(m)}(F5-10) \Big|_{Tf,li} \min = k_{T,li,init}^{(m)}(F5-10) - 26\%$$

Was die rechte Trennfläche betrifft, ist auch hier nur eine Verschiebung nach links möglich. Die maximale Verschiebung um 1 m dieser Trennfläche führt mit dem Mertens-Verfahren zu einer maximalen rechten Trennflächerauheit. Die Zunahme beträgt 69% :

$$k_{T,re}^{(m)}(F5-10) \Big|_{Tf,re} \max = k_{T,re,init}^{(m)}(F5-10) + 69\%$$

Die Trennflächenverschiebung wirkt auf die fiktive Trennflächenrauheit nur über die mittlere Breite des Bewuchsbereiches $b_{II,m}$ ($b_{II,m} = F_{II}/h_T$, mit F_{II} Fläche des Bewuchsbereiches, s. Abschnitt 3.2.3.1.2.1), der stark von dem Querprofil abhängt. Dieser große Unterschied zwischen den Fehlern für die beiden fiktiven Trennflächenrauheiten liegt in dem Böschungsknick an der rechten Böschung. Die Verschiebung der Trennfläche bis zu dem Böschungsknick führt zu einer deutlichen Zunahme der Fläche des rechten Vegetationsbereiches $F_{II,re}$ während $h_{T,re}$ gleich bleibt, was eine deutliche Zunahme der mittleren Breite des rechten Bewuchsbereiches $b_{II,m,re}$ mit sich zieht. Andererseits werden $F_{II,li}$ und $h_{T,li}$ kleiner, wenn Tf_{li} nach links verschoben wird, was zu einer milderer Abminderung von $b_{II,m,li}$ führt.

Die möglichen Fehler für die beiden Trennflächenfußpunkte wirken gemeinsam wie folgt auf $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ (aus der ungünstigsten Kombination der beiden Trennflächenfußpunkten ermittelt):

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_{Tf_{li};Tf_{re}} \approx 2\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_{Tf_{li};Tf_{re}} \approx 5\%$$

Das Verhalten von $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ bzw. von $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ in Abhängigkeit von der Verschiebung der beiden Trennflächen ist im

Bild 46 bzw. im Bild 47 mit den grünen Kurven dargestellt.

Wie bei der Untersuchung des Einflusses der Bewuchsparameter erhalten und aus denselben Gründen, kann auch hier gefolgert werden, dass die möglichen Abweichungen für die Position der Trennflächenfußpunkte nur mit einer kleineren Beeinflussung auf den gesamten berechneten Strickler-Beiwert $k_{St,ges}$ und den berechneten Durchfluss Q_{ber} wirken, während ihre Beeinflussung auf die fiktiven Trennflächenrauheiten groß ist.

- Fehler aufgrund der äquivalenten Sandrauheit der Sohle ks_{so}

Die Rauheit der Sohle spielt keine Rolle bei dem Mertens-Verfahren. Die verschiedenen Rauheiten des Querschnitts sind unabhängig(s. Bild 45).

Der Fehler von ca. 50% für ks_{so} (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.6) wirkt wie folgt auf $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ aus:

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)}{k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_{ks_{so}} = \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)}{Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_{ks_{so}} \approx 8\%$$

Die beiden Fehler für $k_{St,ges}$ und Q_{ber} sind gleich, weil die Sandrauheit der Sohle auch nur über $k_{St,ges}$ auf Q_{ber} wirkt (s. Bild 45). Die Wirkung von ks_{so} in seinem Vertrauensbereich auf $k_{St,ges}(F5-10)$ bzw. auf $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ ist im Bild 46 bzw. im Bild 47 mit der roten Kurve dargestellt. Sie ist deutlich die wichtigste.

- Fehler aufgrund des Wasserspiegelgefälles J

Das Wasserspiegelgefälle J spielt auch keine Rolle bei dem Mertens-Verfahren für die Bestimmung der fiktiven Trennflächenrauheiten (s. Bild 45).

Das Gefälle J ist ein Eingangsparameter für die Überlagerung nach DVWK (1991) (s. Abschnitt 37, Bild 15). Die Sensitivitätsanalyse der Berechnungen hat gezeigt, dass der 2 % Fehler für J(F5-10) wie folgt auf $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ wirkt:

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_J \approx 0\%$$

Die Rolle des Gefälles bei der Ermittlung des berechneten gesamten Strickler-Beiwertes mit der Überlagerung nach DVWK (1991) ist vernachlässigbar.

J wirkt auf Q_{ber} laut der Gauckler-Manning-Strickler Gleichung (s. Abschnitt 3.1.2.3), so dass:

$$\left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,D)}(F5-10)} \right|_J = \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\Delta J(F5-10)}{J_{init}(F5-10)} \right| = 1\%$$

Die Wirkung der Unsicherheit von J auf Q_{ber} ist mit der hellgelben Kurve im Bild 47 dargestellt.

- **Zusammenfassung : Fehlerschranken von $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ bei einer Berechnung mit dem Mertens-Verfahren und der Überlagerung nach DVWK (1991)**

Die Beeinflussung der Fehlergröße von jedem Parameter auf die Genauigkeit der berechneten $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ ist im

Bild 46 dargestellt. Da die Beeinflussung von J und Wsp vernachlässigbar ist, sind diese beiden Parameter in diesem Bild nicht dargestellt. Die Sandrauheit der Sohle ks_{so} ist der sensibelste Parameter von $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$, dann kommt die Wirkung der Trennflächenverschiebungen. Die Bewuchsparameter spielen eine kleinere Rolle.

Die Wirkung der Fehlergröße von jedem Parameter auf den berechneten Durchfluss $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ ist im Bild 47 dargestellt. Man bemerkt, dass J und Wsp eigentlich die sensibelsten Parameter sind. Da sie mit einem kleinen Fehler bestimmt werden, bleibt ihr Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnung von $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ beschränkt.

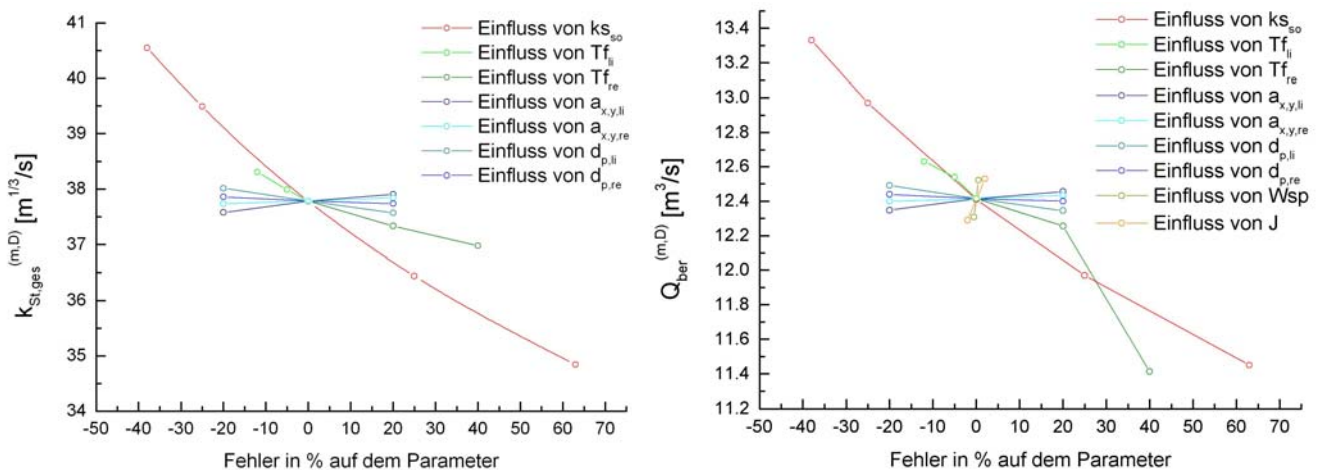


Bild 46: Fehler für $k_{St,ges}^{(m,D)}(H5-10)$ aufgrund der verschiedenen Parameter

Bild 47: Fehler für $Q_{ber}^{(m,D)}(H5-10)$ aufgrund der verschiedenen Parameter

Um die gesamten Fehlerschranken von $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ zu bestimmen, wurden diese beiden Größen mit den ungünstigsten Kombinationen aller Eingangsparameter berechnet :

o $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ bzw. $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ ist minimal für:

- Abstand zw. den Stämmen minimal:

$$a_{x,y,li} = 0,20 \text{ m}$$

$$a_{x,y,re} = 0,67 \text{ m}$$
- Stammdurchmesser maximal:

$$d_{p,li} = 0,016 \text{ m}$$

$$d_{p,re} = 0,11 \text{ m}$$
- Wasserspiegelhöhe minimal (entspricht einem minimalen Durchfluss und einem maximalen Strickler-Beiwert. Da die Beeinflussung von Wsp auf $k_{st,ges}$ vernachlässigbar ist, wird der minimale Wsp hier betrachtet):

$$Wsp(H5-10) = 9,75 \text{ m}$$
- Linke Trennfläche an dem initialen Fußpunkt:

$$Tf_{li} = 4,46 \text{ m}$$
- Rechte Trennfläche nach links verschoben:

$$Tf_{re} = 13,77 \text{ m}$$
- Sandrauheit maximal:

$$ks_{so} = 0,13 \text{ m}$$
- Gefälle minimal (Q_{ber} minimal):

$$J(H5-10) = 0.353 \text{ ‰}$$

Diese Kombination liefert:

$$k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10) \min = 34 \text{ m}^{1/3}/s$$

$$Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10) \min = 10,2 \text{ m}^3/s$$

o $k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)$ bzw. $Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)$ ist maximal für:

- Abstand zw. den Stämmen maximal:

$$a_{x,y,li} = 0,27 \text{ m}$$

$$a_{x,y,re} = 1,01 \text{ m}$$
- Stammdurchmesser minimal:

$$d_{p,li} = 0,011 \text{ m}$$

$$d_{p,re} = 0,08 \text{ m}$$
- Wasserspiegelhöhe:

$$Wsp(H5-10) = 9,77 \text{ m}$$
- Linke Trennfläche nach links verschoben:

$$Tf_{li} = 3,73 \text{ m}$$
- Rechte Trennfläche an dem initialen Fußpunkt:

$$Tf_{re} = 14,77 \text{ m}$$
- Sandrauheit minimal:

$$ks_{so} = 0,08 \text{ m}$$
- Gefälle maximal:

$$J(H5-10) = 0.367 \text{ ‰}$$

Diese Kombination liefert:

$$k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10) \max = 42 \text{ m}^{1/3}/s$$

$$Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10) \max = 14,0 \text{ m}^3/s$$

d.h.:

$$k_{St,ges,init}^{(m,D)}(F5-10) = 38 \text{ m}^{1/3} / s$$

$$34 \text{ m}^{1/3} / s \leq k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10) \leq 42 \text{ m}^{1/3} / s$$

$$Q_{ber,init}^{(m,D)}(F5-10) = 12,4 \text{ m}^3 / s$$

$$10,2 \text{ m}^3 / s \leq Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10) \leq 14,0 \text{ m}^3 / s$$

[47]

Die Größenordnung des maximalen, gesamten Fehlers für die beiden berechneten Werte ist:

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,D)}(F5-10)} \right| \approx 10\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,D)}(F5-10)} \right| \approx 15\%$$

Die beiden Ergebnisse [47] werden mit den rückgerechneten bzw. gemessenen Werten im Bild 50 verglichen. Es wird deutlich bewiesen, dass die mit dem Mertens-Verfahren und der Überlagerung nach DVWK (1991) ermittelten Werte zu hoch sind.

4.4.3.2.2. Analyse der Methode : Trennflächenrauheiten laut Mertens-Verfahren und Überlagerung nach INDLEKOFER (2003)

Dieselben Trennflächenrauheiten wie oben wurden in den Berechnungen benutzt (nach Mertens-Verfahren ermittelt). Die Empfindlichkeit der Überlagerungsmethode nach INDLEKOFER (2003) wurde hier untersucht und die Ergebnisse wurden mit denen der Methode nach DVWK (1991) verglichen.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass das Verhalten des mit dieser Berechnungsmethode berechneten gesamten Stricker-Beiwertes $k_{St,ges}^{(m,I3)}(H5-10)$ und des berechneten Durchflusses $Q_{ber}^{(m,I3)}(H5-10)$ in Abhängigkeit von den Eingangsparametern ähnlich wie bei der Benutzung der Überlagerung nach DVWK(1991) ist (s.

Bild 46 und Bild 47). Die resultierenden Fehler aufgrund der Fehler für die verschiedenen Parameter sind in der Tabelle 29 zusammengefasst.

Als Erinnerung: das Gefälle wird bei den Überlagerungen nach INDLEKOFER (2003 und 2005) nicht benutzt (s. Abschnitte 3.2.3.2.2 und 3.2.3.2.3).

Eingangsparameter	Fehler für $k_{St,ges}^{(m,I3)}(H5-10)$	Fehler für $Q_{ber}^{(m,I3)}(H5-10)$
Bewuchsparameter	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,I3)}(F5-10)}{k_{St,ges}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{a_{x,y,li}; a_{x,y,re}; d_{p,li}; d_{p,re}} = \left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)}{Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{a_{x,y,li}; a_{x,y,re}; d_{p,li}; d_{p,re}} \approx 1\%$	
Wasserspiegel Wsp	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,I3)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{Wsp} \approx 0,2\%$	$\left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{Wsp} \approx 1\%$
Trennflächenfußpunkten Tf_{li} und Tf_{re}	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,I3)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{Tf_{li}; Tf_{re}} \approx 2\%$	$\left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{Tf_{li}; Tf_{re}} \approx 2\%$
Sandrauheit ks_{so}	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,I3)}(F5-10)}{k_{St,ges}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{ks_{so}} = \left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)}{Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{ks_{so}} \approx 7\%$	
Gefälle J	X	$\left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _J = 1\%$

Tabelle 29 : Resultierende Fehler für $k_{St,ges}^{(m,I3)}(H5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,I3)}(H5-10)$ aufgrund der verschiedenen Parameter bei der Überlagerung nach INDLEKOFER (2003)

Die ungünstigsten Kombinationen der Parameter für die Ermittlung der Fehlerschranken von $k_{St,ges}^{(m,13)}(H5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,13)}(H5-10)$ sind dieselben wie bei der Überlagerung nach DVWK (1991). Die Berechnungen mit diesen Kombinationen haben die in der Formel [48] zusammengefassten Ergebnisse geliefert. Diese beiden Fehlerschranken werden im Bild 50 dargestellt und mit den zu erreichenden Werten aus den Rückrechnungen und der ersten Methode verglichen.

$$k_{St,ges,init}^{(m,13)}(F5-10) = 37 m^{1/3} / s$$

$$34 m^{1/3} / s \leq k_{St,ges}^{(m,13)}(F5-10) \leq 41 m^{1/3} / s$$

[48]

$$Q_{ber,init}^{(m,13)}(F5-10) = 12,2 m^3 / s$$

$$10,8 m^3 / s \leq Q_{ber}^{(m,13)}(F5-10) \leq 13,7 m^3 / s$$

Die Größenordnung der maximalen, gesamten Fehler für die beiden berechneten Werte ist :

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,13)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,13)}(F5-10)} \right| \approx 10\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,13)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,13)}(F5-10)} \right| \approx 12\%$$

Abschließend lässt sich sagen, dass die initialen Werte ein wenig näher den zu erreichenden Werten sind und dass die Methode stabiler ist. Der Durchfluss ist weniger empfindlich. Es gibt aber keinen wesentlichen Unterschied zur ersten Methode.

4.4.3.2.2.3. Analyse der Methode : Trennflächenrauheiten laut Mertens-Verfahren und Überlagerung nach INDLEKOFER (2005)

Die Empfindlichkeit der Überlagerungsmethode nach INDLEKOFER (2005) wurde ähnlich wie die Überlagerungsmethode nach INDLEKOFER (2003) untersucht und die Ergebnisse wurden mit denen der Methode nach DVWK (1991) und nach INDLEKOFER (2003) verglichen.

Das Verhalten des mit dieser Berechnungsmethode berechneten gesamten Stricker-Beiwertes $k_{St,ges}^{(m,15)}(H5-10)$ und des berechneten Durchflusses $Q_{ber}^{(m,15)}(H5-10)$ in Abhängigkeit von den Eingangsparametern ist auch ähnlich wie bei der Benutzung der Überlagerung nach DVWK (1991) (s.

Bild 46 und Bild 47). Die anhand der Sensitivitätsanalyse ermittelten, resultierenden Fehler für $k_{St,ber}^{(m,15)}(H5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,15)}(H5-10)$ sind in der Tabelle 30 zusammengefasst.

Eingangsparameter	Fehler für $k_{St,ges}^{(m,I3)}(H5-10)$	Fehler für $Q_{ber}^{(m,I3)}(H5-10)$
Bewuchsparameter	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,I5)}(F5-10)}{k_{St,ges}^{(m,I5)}(F5-10)} \right _{a_{x,y,li}; a_{x,y,re}; d_{p,li}; d_{p,re}} = \left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I5)}(F5-10)}{Q_{ber}^{(m,I5)}(F5-10)} \right _{a_{x,y,li}; a_{x,y,re}; d_{p,li}; d_{p,re}} \approx 1\%$	
Wasserspiegel Wsp	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,I5)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,I5)}(F5-10)} \right _{Wsp} \approx 0,1\%$	$\left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I5)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,I5)}(F5-10)} \right _{Wsp} \approx 0,4\%$
Trennflächenfußpunkte Tf_{li} und Tf_{re}	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,I5)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,I5)}(F5-10)} \right _{Tf_{li}; Tf_{re}} \approx 2\%$	$\left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I5)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,I5)}(F5-10)} \right _{Tf_{li}; Tf_{re}} \approx 2\%$
Sandrauheit ks_{so}	$\left \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,I3)}(F5-10)}{k_{St,ges}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{ks_{so}} = \left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)}{Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _{ks_{so}} \approx 8\%$	
Gefälle J	X	$\left \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I3)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,I3)}(F5-10)} \right _J = 1\%$

Tabelle 30 : Resultierende Fehler für $k_{St,ges}^{(m,I5)}(H5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,I5)}(H5-10)$ aufgrund der verschiedenen Parameter bei der Überlagerung nach INDLEKOFER (2005)

Die ungünstigsten Kombinationen der Parameter für die Ermittlung der Fehlerschranken von $k_{St,ges}^{(m,I5)}(H5-10)$ und $Q_{ber}^{(m,I5)}(H5-10)$ sind auch dieselben wie bei der Überlagerung nach DVWK-91. Die Berechnungen mit diesen Kombinationen haben die in der Formel [49] zusammengefassten Ergebnisse geliefert. Diese beiden Fehlerschranken werden im Bild 50 dargestellt und mit den Werten aus den Rückrechnungen und den beiden ersten Methoden verglichen.

$$k_{St,ges,init}^{(m,I5)}(F5-10) = 38m^{1/3} / s$$

$$34m^{1/3} / s \leq k_{St,ges}^{(m,I5)}(F5-10) \leq 42m^{1/3} / s$$

[49]

$$Q_{ber,init}^{(m,I5)}(F5-10) = 12,4m^3 / s$$

$$10,8m^3 / s \leq Q_{ber}^{(m,I5)}(F5-10) \leq 14,0m^3 / s$$

Die Größenordnung der maximalen, gesamten Fehler für die beiden berechneten Werte ist:

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(m,I5)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(m,I5)}(F5-10)} \right| \approx 10\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(m,I5)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(m,I5)}(F5-10)} \right| \approx 13\%$$

Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Ergebnissen aus den beiden anderen Überlagerungsmethoden.

Abschließend lässt sich feststellen, dass es keinen wesentlichen Unterschied zwischen den verschiedenen Überlagerungsmethoden gibt. Die Überlagerung nach INDLEKOFER (2003)

ist ein wenig stabiler. Deshalb wird im Folgenden für die Untersuchung des Specht-Verfahrens nur diese Überlagerungsmethode benutzt.

4.4.3.2.2.4. Analyse der Methode : Trennflächenrauheiten laut Specht-Verfahren und Überlagerung nach INDLEKOFER (2003)

Die Empfindlichkeit der Berechnungsmethode anhand des Specht-Verfahrens und der Überlagerung nach INDLEKOFER (2003) wurde, ähnlich wie oben angeführt, untersucht.

- Fehler aufgrund der Bewuchsparameter

Der 20%ige Fehler für die Bewuchsparameter $a_{x,y,li}$ und $d_{p,li}$ bzw. $a_{x,y,re}$ und $d_{p,re}$ führt mit dem Specht-Verfahren zu den folgenden prozentuellen Fehlern bei der Ermittlung der beiden fiktiven Trennflächenrauheiten :

Links :

$$\left| \frac{\Delta k_{T,li}^{(s)}(F5-10)}{k_{T,li,init}^{(s)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,li}; d_{p,li}} \approx 48\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta k_{T,li}^{(s)}(F5-10)}{k_{T,li,init}^{(s)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,re}; d_{p,re}} \approx 1\%$$

So dass : $\left| \frac{\Delta k_{T,li}^{(s)}(F5-10)}{k_{T,li,init}^{(s)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,li}; d_{p,li}; a_{x,y,re}; d_{p,re}} \approx 49\%$

Rechts :

$$\left| \frac{\Delta k_{T,re}^{(s)}(F5-10)}{k_{T,re,init}^{(s)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,re}; d_{p,re}} \approx 12\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta k_{T,re}^{(s)}(F5-10)}{k_{T,re,init}^{(s)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,li}; d_{p,li}} \approx 5\%$$

So dass : $\left| \frac{\Delta k_{T,re}^{(s)}(Q1-F05-10m^3/s)}{k_{T,re,init}^{(s)}(Q1-F05-10m^3/s)} \right|_{a_{x,y,li}; d_{p,li}; a_{x,y,re}; d_{p,re}} \approx 17\%$

Bei dem Specht-Verfahren ist eine Interaktion zwischen den linken und rechten Bewuchszonen aufgrund der unsymmetrischen Anordnung des Querprofils berücksichtigt : die beiden Bewuchszonen haben für jede Trennflächenrauheit eine gekoppelte Wirkung (s. Definition des Parameters c_{geo} im Abschnitt 3.2.3.1.2.2). Der deutliche Unterschied zwischen den Fehlern für die beiden Seiten ist auf denselben Grund wie bei dem Mertens-Verfahren zurückzuführen, da nämlich das Specht-Verfahren eine Ergänzung dieses Verfahrens ist.

Die Bewuchsparameterempfindlichkeit der Trennflächenrauheit bleibt in derselben Größenordnung wie bei dem Mertens-Verfahren (s. Abschnitt 4.4.3.2.2.1, Ergebnis [46]). Die Fehler für jeden Bewuchsparameter wirken gemeinsam wie folgt auf $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$:

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)}{k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,li}; a_{x,y,re}; d_{p,li}; d_{p,re}} = \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)}{Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)} \right|_{a_{x,y,li}; a_{x,y,re}; d_{p,li}; d_{p,re}} \approx 3\%$$

Mit dem Specht-Verfahren werden die Trennflächenrauheiten deutlich höher als bei dem Mertens-Verfahren (s. Tabelle 27), während die äquivalente Sandrauheit der Sohle $k_{s,so}$ gleich groß bleibt. Der Einfluss der Trennflächenrauheiten auf $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ wird deshalb größer. Der Fehler für die Bewuchsparameter, die auf $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ nur über die Trennflächenrauheiten wirken, werden ebenso größer.

Es kann dennoch am Ende gefolgert werden, dass der Einfluss der Bewuchsparameter mit dem Specht-Verfahren in Kombination mit der Überlagerung nach INDLEKOFER (2003) auf $k_{St,ges}$ bzw. Q_{ber} niedrig bleibt, auch wenn sie groß auf die fiktiven Trennflächenrauheiten wirken.

- Fehler aufgrund des Wasserspiegels Wsp

Der +/- 1 cm Fehler für den Wasserspiegel führt mit dem Specht-Verfahren zu den folgenden prozentuellen Fehlern bei der Ermittlung der beiden fiktiven Trennflächenrauheiten:

$$\left| \frac{\Delta k_{T,li}^{(s)}(F5-10)}{k_{T,li,init}^{(s)}(F5-10)} \right|_{Wsp} \approx \left| \frac{\Delta k_{T,re}^{(s)}(F5-10)}{k_{T,re,init}^{(s)}(F5-10)} \right|_{Wsp} \approx 0,1\%$$

Die Wasserspiegelhöhe Wsp hat bei dem Specht-Verfahren noch weniger Einfluss auf die fiktiven Trennflächenrauheiten als bei dem Mertens-Verfahren.

Der Fehler für Wsp wirkt wie folgt auf $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$:

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(s,I3)}(F5-10)} \right|_{Wsp} \approx 0,2\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(s,I3)}(F5-10)} \right|_{Wsp} \approx 1\%$$

Der Einfluss von Wsp bleibt so hoch wie bei den anderen Methoden und ist auf $k_{st,ges}$ vernachlässigbar. Die Wirkung der Fehler bei der Bestimmung des Parameters Wsp auf $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$ ist im Bild 48 mit der dunkelgelben Kurve dargestellt.

- Fehler aufgrund der Trennflächenfußpunkte

Bei dem Specht-Verfahren hat die Geometrie der Bewuchszonen einen größeren Einfluss auf die Trennflächenrauheiten. Außerdem wirken die beiden Bewuchszonen auf jede Trennflächenrauheit. Deshalb ist das Verhalten der Trennflächenrauheiten mit der Verschiebung der Trennflächenfußpunkte komplexer als bei dem Mertens-Verfahren. Die Untersuchungen mit dem Specht-Verfahren haben gezeigt, dass:

- die linke Trennflächenrauheit $k_{T,li}$ minimal für den initialen Zustand der beiden Trennflächenfußpunkte wird:

$$k_{T,li}^{(s)}(F5-10) \Big|_{Tf_{li}, Tf_{re}} \min = k_{T,li,init}^{(s)}(F5-10)$$

Sie wird maximal für eine Verschiebung der linken Trennfläche um 0,23 m und der rechten Trennfläche um 1 m. Diese Kombination liefert:

$$k_{T,li}^{(s)}(F5-10) \Big|_{Tf_{li}, Tf_{re}} \max = k_{T,li,init}^{(s)}(F5-10) + 49\%$$

- die rechte Trennflächenrauheit $k_{T, re}$ minimal für eine Verschiebung der linken Trennfläche um 0,73 m und die rechte Trennfläche in den initialen Zustand wird. Diese Kombination liefert:

$$k_{T, re}^{(s)}(F5-10) \Big|_{T_{fi}, T_{re}} \min \approx k_{T, re, init}^{(s)}(F5-10)$$

Sie wird maximal für denselben Trennflächenzustand wie für den o.a. maximalen Wert von $k_{T, li}(F5-10)$. Dies liefert:

$$k_{T, re}^{(s)}(F5-10) \Big|_{T_{fi}, T_{re}} \max = k_{T, re, init}^{(s)}(F5-10) + 56\%$$

Die o.a. ungünstigsten Kombinationen der möglichen Fehler für die beiden Trennflächenfußpunkte führen zu den folgenden Fehlern bei der Ermittlung von $k_{St, ges}^{(s, I3)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(s, I3)}(F5-10)$:

$$\left| \frac{\Delta k_{St, ges}^{(s, I3)}(F5-10)}{k_{St, ges, init}^{(s, I3)}(F5-10)} \right|_{T_{fi}, T_{re}} \approx 5\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(s, I3)}(F5-10)}{Q_{ber, init}^{(s, I3)}(F5-10)} \right|_{T_{fi}, T_{re}} \approx 5\%$$

Abschließend lässt sich auch hier sagen, dass der Fehler für die Trennflächenfußpunkte nur mit einer kleineren Beeinflussung auf den gesamten berechneten Strickler-Beiwert $k_{St, ges}$ und den berechneten Durchfluss Q_{ber} wirkt, während ihre Beeinflussung auf die fiktive Trennflächenrauheit groß ist.

Das Verhalten von $k_{St, ges}^{(s, I3)}(F5-10)$ bzw. $Q_{ber}^{(s, I3)}(F5-10)$ im Vertrauensbereich der verschiedenen Parameter ist mit den grünen Kurven im Bild 48 bzw. im Bild 49 dargestellt.

- Fehler aufgrund der äquivalenten Sandrauheit der Sohle $k_{s, so}$ und des Gefälles J

Die Rauheit der Sohle und das Gefälle spielen keine Rolle bei der Ermittlung der Trennflächenrauheiten. Ihr Einfluss ist ähnlich wie schon bei der oben untersuchten Überlagerung nach INDLEKOFER (2003) (s. Abschnitt 4.4.3.2.2.2).

Der ca. 50% Fehler für $k_{s, so}$ wirkt wie folgt auf $k_{St, ges}^{(s, I3)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(s, I3)}(F5-10)$:

$$\left| \frac{\Delta k_{St, ges}^{(s, I3)}(F5-10)}{k_{St, ges}^{(s, I3)}(F5-10)} \right|_{k_{s, so}} = \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(s, I3)}(Q1-F05-10)}{Q_{ber}^{(s, I3)}(F5-10)} \right|_{k_{s, so}} \approx 6\%$$

Der 2 %ige Fehler für J(F5-10) wirkt wie folgt auf $Q_{ber}^{(s, I3)}(F5-10)$:

$$\left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(s, I3)}(F5-10)}{Q_{ber, init}^{(s, I3)}(F5-10)} \right|_J = 1\%$$

Die Wirkung des Fehlers für die Sandrauheit der Sohle $k_{s, so}$ auf $k_{St, ges}^{(s, I3)}(F5-10)$ bzw. $Q_{ber}^{(s, I3)}(F5-10)$ ist mit der roten Kurve im Bild 48 bzw. im Bild 49 dargestellt. Das Verhalten von $Q_{ber}^{(s, I3)}(F5-10)$ im Vertrauensbereich vom Gefälle J ist mit der hellgelben Kurve im Bild 49 dargestellt.

- **Zusammenfassung : Fehlerschranken von $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$ bei einer Berechnung mit dem Specht-Verfahren und der Überlagerung nach INDLEKOFER (2003)**

Die Beeinflussung der Fehler bei der Bestimmung von jedem Parameter auf die Genauigkeit des berechneten $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ bzw. $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$ ist im Bild 48 bzw. im Bild 49 dargestellt. Die Fehler für die Wasserspiegellhöhe Wsp und die Trennflächenfußpunkte wurden bis hier absolut in Zentimeter angegeben. Um die Wirkung dieser Fehler mit denen der anderen Parameter vergleichen zu können, ist eine relative Fehlergröße in % notwendig. Daher wird der Fehler für Wsp in % der mittleren Fließtiefe im Bild 48 und im Bild 49 umgerechnet. Ebenso wird der Fehler für die Trennflächenfußpunkte in % der Breite der Bewuchszone umgerechnet.

Auch wenn die Bewuchsparameter und die Trennflächenfußpunkte eine größere Beeinflussung bei der Benutzung des Specht-Verfahrens haben, bleibt das Verhalten von $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ bzw. $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$ mit den verschiedenen Parametern grundsätzlich ähnlich wie bei der Benutzung des Mertens-Verfahrens (s. Bild 46 und Bild 47).

Bild 46 und Bild 47).

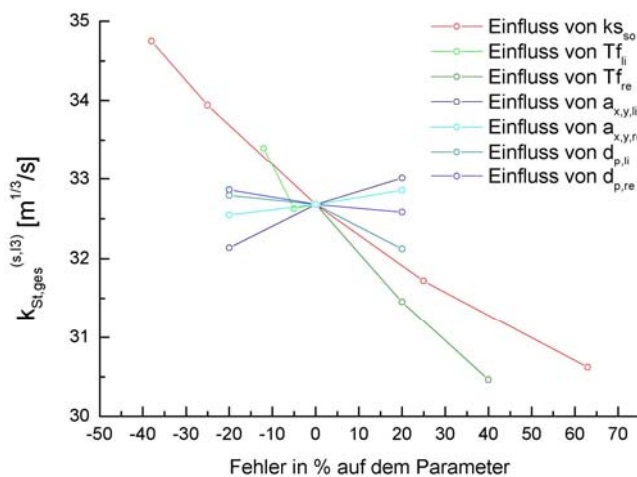


Bild 48 : Fehler für $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ aufgrund der verschiedenen Parameter

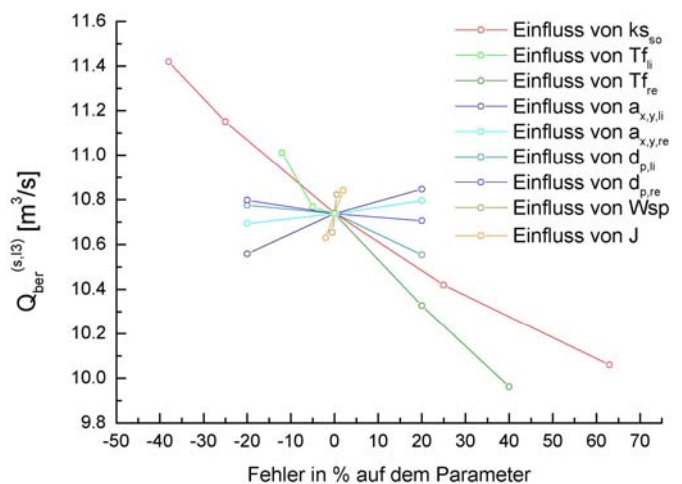


Bild 49 : Fehler für $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$ aufgrund der verschiedenen Parameter

Um die Fehlerschranken von $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ und $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$ zu bestimmen, wurden diese beiden Werten mit den ungünstigsten Kombinationen der Eingangsparameter berechnet:

o $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ bzw. $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$ ist minimal für:

- Abstand zw. den Stämmen minimal:

$$a_{x,y,li} = 0,20 \text{ m}$$

$$a_{x,y,re} = 0,67 \text{ m}$$

- Stammdurchmesser maximal:

$$d_{p,li} = 0,016 \text{ m}$$

$$d_{p,re} = 0,11 \text{ m}$$

- Wasserspiegellhöhe minimal:

$$Wsp(H5-10) = 9,75 \text{ m}$$

- Linke Trennfläche nach links um 0,23 m verschoben:

$$T_{f,li} = 4,23 \text{ m}$$

- Rechte Trennfläche nach links maximal verschoben:

$$T_{f,re} = 13,77 \text{ m}$$

- Sandrauheit maximal:

$$k_{s,so} = 0,13 \text{ m}$$

- Gefälle minimal: $J(H5-10) = 0.353 \text{ ‰}$

Diese Kombination liefert:

$$k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10) \min = 27 \text{ m}^{1/3}/s$$

$$Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10) \min = 8,7 \text{ m}^3/s$$

- o $k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)$ bzw. $Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)$ ist maximal für:

- Abstand zw. den Stämmen minimal:

$$a_{x,y,li} = 0,27 \text{ m}$$

$$a_{x,y,re} = 1,01 \text{ m}$$
- Stammdurchmesser maximal:

$$d_{p,li} = 0,011 \text{ m}$$

$$d_{p,re} = 0,08 \text{ m}$$
- Wasserspiegelhöhe minimal:

$$Wsp(H5-10) = 9,77 \text{ m}$$
- Linke Trennfläche nach links maximal verschoben:

$$Tf_{li} = 3,73 \text{ m}$$
- Rechte Trennfläche an der initialen Position:

$$Tf_{re} = 14,77 \text{ m}$$
- Sandrauheit minimal:

$$ks_{so} = 0,08 \text{ m}$$
- Gefälle maximal:

$$J(H5-10) = 0.367 \text{ ‰}$$

Diese Kombination liefert:

$$k_{St,ges}^{(m,D)}(F5-10) \max = 37 \text{ m}^{1/3}/s$$

$$Q_{ber}^{(m,D)}(F5-10) \max = 12,4 \text{ m}^3/s$$

Wir haben mit dem Specht-Verfahren und die Überlagerung nach INDLEKOFER (2003):

[50]

$$k_{St,ges,init}^{(s,I3)}(F5-10) = 33 \text{ m}^{1/3} / s$$

$$27 \text{ m}^{1/3} / s \leq k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10) \leq 37 \text{ m}^{1/3} / s$$

$$Q_{ber,init}^{(s,I3)}(F5-10) = 10,7 \text{ m}^3 / s$$

$$8,7 \text{ m}^3 / s \leq Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10) \leq 12,4 \text{ m}^3 / s$$

Die Größenordnung des maximalen, gesamten Fehlers für die beiden berechneten Werte ist :

$$\left| \frac{\Delta k_{St,ges}^{(s,I3)}(F5-10)}{k_{St,ges,init}^{(s,I3)}(F5-10)} \right| \approx 15\% \quad \text{und} \quad \left| \frac{\Delta Q_{ber}^{(s,I3)}(F5-10)}{Q_{ber,init}^{(s,I3)}(F5-10)} \right| \approx 17\%$$

Die Ergebnisse [50] sind im Bild 50 mit den zu erreichenden Werten verglichen.

4.4.3.2.3. Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse mit den zu erreichenden Werten

Die mit den verschiedenen Methoden ermittelten Fehlerschranken der Größen $k_{St,ges}^{(s,13)}$ (F5-10) und $Q_{ber}^{(s,13)}$ (F5-10) sind im Bild 50 gegenübergestellt.

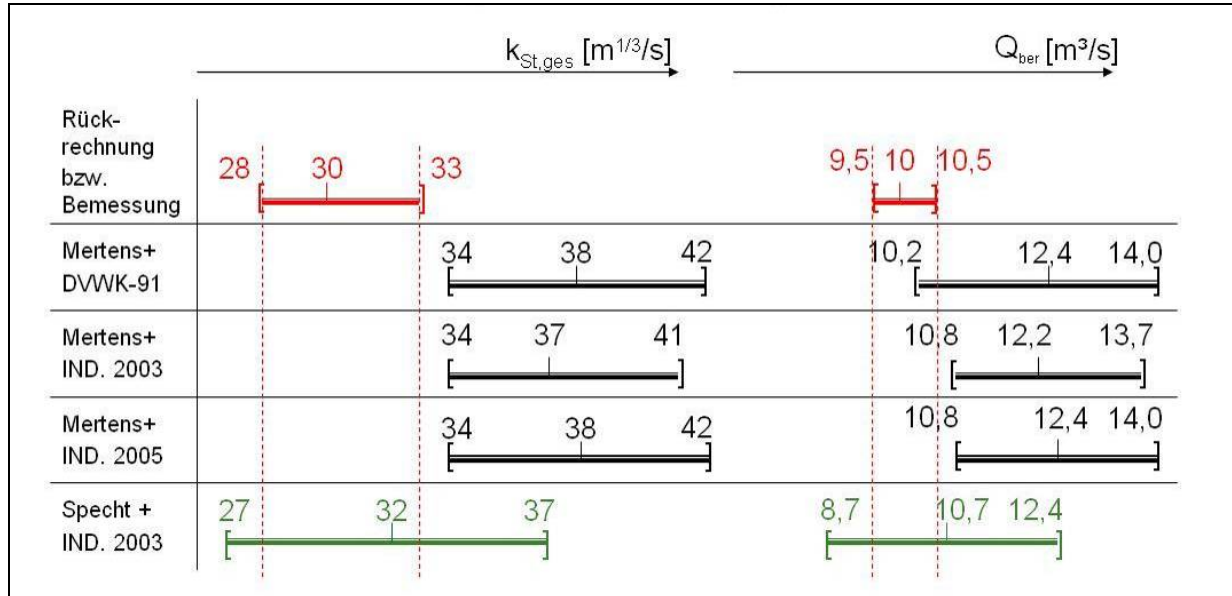


Bild 50 : Vergleich mit den rückgerechneten Werten der mit den verschiedenen Methoden ermittelten Fehlerschranken des berechneten gesamten Strickler-Beiwertes und des berechneten Durchflusses im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$

Die Überlagerung nach INDLEKOFER (2003) ist die beste Überlagerungsmethode; der Unterschied mit den anderen Methoden ist dennoch nicht wesentlich.

Die Kombination des Specht-Verfahrens mit der Überlagerung nach INDLEKOFER (2003) liefert Ergebnisse, die den rückgerechneten und gemessenen Werten sehr gut entsprechen. Das Specht-Verfahren ist eindeutig die beste Methode zur Berechnung der Trennflächenrauheiten, auch wenn es zu einer breiteren Fehlerschranke des berechneten gesamten Strickler-Beiwertes und des berechneten Durchflusses führt. Das Specht-Verfahren führt nämlich zu einer deutlichen Erhöhung der Trennflächenrauheiten (s. Abschnitt 4.4.3.1.2.2, Tabelle 27), was $k_{St,ges}$ und Q_{ber} deutlich abmindert.

Die Sensitivitätsanalyse hat auch gezeigt (s.

Bild 46, Bild 47, Bild 48, Bild 49), dass der Fehler für die äquivalente Sandrauheit der Sohle k_{s0} die Genauigkeit der Berechnungen am meisten beeinflusst. Der große Fehler bei ihrer Bestimmung wirkt nämlich zusätzlich mit einer großen Empfindlichkeit im Vergleich zu den anderen Parametern. Deshalb ist die Bestimmung dieses Eingangsparameters von größter Bedeutung. Der zweite wichtige Parameter ist die Position der Trennflächen. Ihre Bestimmung sollte genauer definiert werden.

Die Parameter W_{sp} und J wirken ebenso mit einer großen Empfindlichkeit auf den berechneten Durchfluss. Aber ihre Bestimmung mit einem ziemlich kleinen Fehler beschränkt ihren Einfluss.

5. Résumé

Laut den ersten Messauswertungen der Machfeldkanal Betriebsgesellschaft haben die zwischen 2004 und 2005 am Russbach durchgeführten Pflegemaßnahmen die größte Aussagekraft im Messprofil Q1. Daher wurden die in dieser Diplomarbeit vertieften Untersuchungen der Durchflussberechnungen auf das Profil Q1 beschränkt.

Die Rückrechnung der gesamten Strickler-Beiwerte für das Profil Q1 im Herbst 2004 und im Frühjahr 2005 am Russbach aus den, von der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal durchgeführten, Durchfluss- und Wasserstandmessungen und die Bestimmung der Fehlerschranken haben die ersten Aussagen der Betriebsgesellschaft Machfeldkanal bestätigt. Die zwischen den beiden Messterminen durchgeführten **Pflegemaßnahmen haben eindeutig eine effiziente Wirkung auf den Abflusswiderstand** gehabt (s. Abschnitt 4.4.1.4).

Die Sensitivitätsanalyse der Berechnung der mittleren Strickler-Beiwerte $k_{St,ges}$ anhand der Berechnungen nach MERTENS (1989), SPECHT (2002) und INDLEKOFER (2003 und 2005) liefern weitere Informationen über die Wirkung jeder Pflegemaßnahme (Entfernung der einhängenden Äste, Abstockung, Auslichtung). Die Untersuchung - insbesondere die Empfindlichkeitsanalyse, die der Kern der Arbeit war - der Berechnung der Fließwiderstände aufgrund des Impulsaustauschs zwischen dem Hauptabflussbereich und den Bewuchszonen an den Ufern und deren Überlagerung mit dem Sohlwiderstand erlauben folgende Schlussfolgerungen:

➤ Die Situation im Frühjahr 2005 nach Pflegemaßnahmen kann befriedigend modelliert werden (s. Abschnitt 4.4.3.2.3). Für den Herbst 2004 liefert die durchgeführte rechnerische Modellierung des mittleren Strickler-Beiwert $k_{St,ges}$ dagegen kein befriedigendes Ergebnis. Im Jahre 2004 waren im Profil Q1 einhängende Äste vorhanden, deren Einfluss bei den Berechnungen nicht berücksichtigt wurden. Der Fließverlust infolge dieser Äste wird nicht modelliert (zurzeit noch kein Modell vorhanden). Die unbefriedigende Modellierung der Situation in 2004 ist auf diesen Mangel zurückzuführen (s.4.4.3.1.1.3). Der **unvernachlässigbare Beitrag des Fließwiderstandes aufgrund einhängender Äste** zum gesamten Abflusswiderstand ist daher bewiesen und die weiteren Aussagen können getätigt werden :

- Hinsichtlich der rechnerischen Modellierung :
Um genauere Informationen über die Wirkung der einhängenden Äste auf den Durchfluss zu bekommen, müssen Laborversuche durchgeführt werden, mit dem Ziel, den resultierenden Energieverlust zu quantifizieren.
- Praktische Schlussfolgerung :
Im Rahmen der Pflegemaßnahmen ist die Entfernung der einhängenden Äste am Wirksamsten um die hydraulische Leistungsfähigkeit des Fließgewässers zu erhöhen (s. Abschnitt 4.4.3.1.1.3).

➤ Das **Mertens-Verfahren mit Ergänzung nach Specht** als Berechnungsverfahren für die fiktiven Trennflächenrauheiten und die Rauheitsüberlagerung nach **INDLEKOFER (2003)** ist die beste Kombination der Berechnungsmethoden für die Ermittlung des gesamten berechneten Strickler-Beiwertes im Profil Q1 im Herbst 2005, d.h., insbesondere, wenn nur vertikalachsiger Bewuchs im Querschnitt vorhanden ist (s. Abschnitt 4.4.3.2.3).

➤ Die **Bewuchsparameter** (d.h. praktisch die **Dichte** der Bewuchszonen) haben am Russbach im Profil Q1, wie es zuerst angenommen wurde, grundsätzlich **keinen signifikanten Einfluss** auf den gesamten Strickler-Beiwert, weil die Bewuchszonen im Vergleich zum gesamten Querschnitt klein sind (s. Abschnitt 4.4.3.2.2 und insbesondere Bild 48). Daher kann die folgende Aussage herangezogen werden:

- Bei den Pflegemaßnahmen wäre die Auslichtung in hydraulischer Hinsicht nicht notwendig, um die hydraulische Leistungsfähigkeit des Fließgewässers zu gewährleisten.

➤ Die **Trennflächenfußpunkte** sind **signifikante Parameter** des berechneten gesamten Strickler-Beiwertes. Daher können die folgenden Aussagen abgeleitet werden:

- Hinsichtlich der rechnerischen Modellierung:
Zur genaueren Berechnung des gesamten Strickler-Beiwertes sind die Trennflächenfußpunkte präziser zu bestimmen (engerer Vertrauensbereich)
- Praktische Schlussfolgerung:
Bei den Pflegemaßnahmen ist die Instandhaltung der Breite der Bewuchszonen im Vergleich zu der Instandhaltung der Vegetationsdichte von größerer Bedeutung.

➤ Die **Rauheit der Sohle** angegeben als äquivalente Sandrauheit $k_{s_{so}}$ ist der **signifikanteste Parameter** für die Bestimmung von $k_{St,ges}$. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der von der Sohle beeinflussende Anteil (F_{so}) an der Gesamtdurchflussfläche (F_{ges}) viel größer ist als die Summe jener Flächenanteile (ΣF_T), die den fiktiven Trennflächenrauheiten zuzuschreiben sind (Größenordnung : $F_{so} \approx 10 \text{ m}^2 \gg F_T \approx 2 \text{ m}^2$), grundsätzlich, weil $u_{so} \gg h_T$. Daher ist die genaue Bestimmung von $k_{s_{so}}$ sehr wichtig.

➤ Die in dieser Arbeit durchgeführte Bestimmung von $k_{s_{so}}$ erlaubt folgendes Ordnungsprinzip : damit die maßgeblichen Korndurchmesser der Sieblinie am besten mit der Rückrechnung von $k_{s_{so}}$ anhand der Darcy-Weisbach Gleichung übereinstimmt, muss :

- der Ansatz für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes der Sohle λ_{so} mit höchsten Präzisionen gewählt werden. Die folgenden Bedingungen müssen erfüllt werden (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.6):
 - o Der Querschnitt ist „kompakt“ (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.2)
 - o Der Einfluss der Sohlrauheit wirkt streng genommen als einziger Fließwiderstand
 - o Der Formbeiwert f mit der Definition nach SÖHNGEN (1987) muss im Argument des Logarithmus bei der Definition von λ_{so} angewendet werden (s. 4.4.2.1.2.4)
- das Gefälle J möglichst genau bestimmt werden (4.4.2.1.2.5).

Um den Vertrauensbereich der Sandrauheit der Sohle zu beschränken, wäre ein Vergleich von $k_{s_{so}}$, die aus den zwei letzten oben eingeführten Bedingungen entsprechenden Messungen (praktisch bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$) rückgerechnet wurden, von Interesse. Aber nur ein Messtermin (im Frühjahr 2005), der schon in dieser Arbeit behandelt wurde, wurde zurzeit bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt.

Die Untersuchung der Berechnungsmethoden von $k_{St,ges}$ haben erlaubt, die für den Russbach bedeutenden Parameter der Fließverlustmodellierung hervorzuheben und zugleich auf die Durchführung praktischer Pflegemaßnahmen zu schließen. Die Schlussfolgerungen über den Einfluss des Bewuchses auf die Berechnung von $k_{St,ges}$ sind, dank dieser Diplomarbeit, nur für Q1 und für das Frühjahr 2005 bestätigt worden. Um das Modell generell für den gesamten Russbach und für beliebige Bewuchsanordnungen zu bestätigen, sind ähnliche Berechnungen in den anderen Messprofilen am Russbach und für die weiteren Messtermine durchzuführen.

Was die praktischen Aussagen für die Pflegemaßnahmen betrifft, muss auch anhand von weiteren Untersuchungen festgelegt werden, ob sie der Realität tatsächlich entsprechen. z.B. ist die Dichte des Bewuchses auch ohne bedeutenden Einfluss auf die reellen (d.h. nicht modellierten) Fließverluste? Dies könnte mit Rückrechnung von Strickler-Beiwerten aus Messungen von verschiedenen Messterminen, deren Bedingungen sich nur durch die Dichte der Bewuchsanordnung unterscheiden, untersucht werden.

Die Schlussfolgerung aus dem „Russbach-Q1“ können nicht generell auf ähnliche naturnahe gestaltete Fließgewässer mit trapezförmigen Querschnitten übertragen werden. Die benetzte Bewuchszone am Russbach ist zu klein, um Aussagen für die Modellierung des Impulsaustauschs mit Bewuchszonen bestätigen zu können. Dazu sind weitere Fließgewässer zu untersuchen, die eine größere benetzte Bewuchszone für den Bemessungsfall aufweisen und – dies ist ein wesentliches Kriterium – bei denen der Bemessungsdurchfluss auch künstlich herstellbar ist. Eine vorausgehende (bzw. begleitende) Untersuchung mit Hilfe des hydraulisch-physikalischen Modellversuchs kann relativ kostengünstig die doch sehr aufwändigen Messungen in der Natur auf das notwendigste Ausmaß reduzieren.

6. Literatur

CAYUELA-LOPEZ Manuel, 2005 :

Empfindlichkeit von Kalkulationsmethoden in naturnahen Gewässerquerschnitten -
Diplomarbeit, Polytechnische Universität Valencia (Spanien), 2005

DFG, 1987 (Deutsche Forschungsgesellschaft) :

Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau – Forschungsbericht
VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1987

DITTRICH Andreas, 1998 :

Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer – Heft 198
Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität
Karlsruhe(TH), 1998

DVWK, 1991 (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau) :

Merkblatt zur Wasserwirtschaft 220/191 – Hydraulische Berechnung von
Fließgewässern
Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1991

Errichtungsgesellschaft MACHFELDKANAL, 1988

Technischer Bericht – Gerinneabschnitt H
Verfasser : Zivilingenieurbüro Helmut WERNER

HOENTZSCH, 2006

Kurzeinleitung Fehlerrechnung
Universität Paderborn – Fakultät für Naturwissenschaften – Physikalisches Praktikum
[http://physik.uni-
paderborn.de/fileadmin/physik/studieninfos/praktika/dokumente/fehlerrechnung.pdf](http://physik.uni-paderborn.de/fileadmin/physik/studieninfos/praktika/dokumente/fehlerrechnung.pdf)

INDLEKOFER Horst, 2003 :

Abflussberechnung für naturnahe Fließgewässer nach dem Mertens-Strickler-
Verfahren
Wasser & Boden, 55/7+8 – Blackwell Verlag, Berlin (2003)

INDLEKOFER Horst, 2005 :

Die Darcy-Weisbach-Formel bei extremer Rauheitsgliederung in Fließgewässer
Wasser und Abfall 12, 2005

KAISER Wolfgang, 1984

Fließwiderstandverhalten in Gerinnen mit durchströmten Ufergehölzzonen – Nr 23
Mitteilungen des Institutes für Wasserbau, konstruktiver Wasserbau und
Wasserwirtschaft der Technischen Hochschule Darmstadt, 1984

KNAUF, Dieter

Zusammenhang zwischen Rauheitsbeiwerten nach Gauckler-Manning-Strickler und
den äquivalenten Rauheitsbeiwerten nach Prandtl-Colebrook im hydraulisch rauen
Bereich
Wasser und Abfall 4/5, 2003

KRADOLFER Werner, 1983 :

Berechnung des Normalabflusses in Gerinnen mit einfachen und gegliederten Querschnitten – Nr. 65
Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie – Technische Hochschule Zürich, 1983

LEHMANN Boris, 2005

Empfehlungen zur naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Raum – Unter Berücksichtigung der Hochwassersicherheit – Heft 230
Mitteilungen des Institutes für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe(TH), 2005

MERTENS Wolfgang , 1994

Zum Strömungswiderstand naturnaher Fließgewässer
Wasserwirtschaft 84, Heft 3, 1994

MERTENS Wolfgang, 1989

Zur Frage hydraulischer Berechnungen naturnaher Fließgewässer
Wasserwirtschaft 79, Heft 4, 1989

MFK, 2007 :

Interner Zwischenbericht der Machfeldkanal-Betriebsgesellschaft
Zurzeit noch nicht veröffentlicht.

RITTERBACH Eckard, 1991 :

Wechselwirkungen zwischen Auenökologie und Fließgewässerhydraulik und Möglichkeiten der integrierenden computergestützten Planung – Nr. 80
Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Wasserwirtschaft – Technische Hochschule Aachen, 1991

SPECHT Franz-Josef, 2002 :

Einfluss von Gerinnebreite und Uferbewuchs auf die hydraulisch-sedimentologischen Verhältnisse naturnaher Fließgewässer – Dissertation
Mitteilung des Institutes für Wasserbau – Technische Universität Braunschweig, 2002

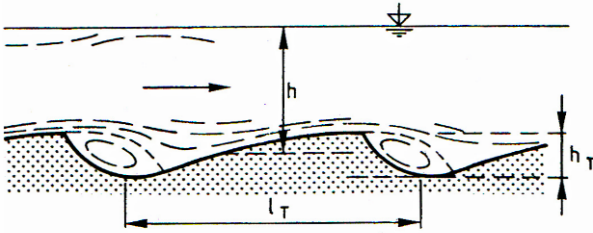
7. Anhang

	<i>Seite</i>
Anhang 1: Typische äquivalente Sandrauheiten k_s (mm) bei verschiedenen Wandungsarten	117
Anhang 2: Übersicht über die Untersuchungen des DFG-Programmes zur Bestimmung des Einflusses von Vegetation im Hinblick auf die Interaktion in gegliederten Gerinnen	118
Anhang 3: Struktogramm zur Berechnung der Trennflächenrauheit bei dem Mertens-Verfahren – Empfehlung nach INDLEKOFER (2003)	119
Anhang 4: Elemente des Querschnittsaufbaus am Russbach – Machfeldkanal Projekt	120
Anhang 5: Machfeldkanal – Übersichtplan (erste Hälfte von Einlauf in Langenzersdorf bis Leopoldsdorf)	123
Anhang 6: Detail der Strecke R1 am Russbach	124
Anhang 7: Wasserstandmessungen der Machfeldkanalbetriebsgesellschaft und des hydraulischen Dienstes NÖ	125
Anhang 8: Durchflussmessungen der Machfeldkanalbetriebsgesellschaft	126
Anhang 9: Stangenmessungen im Profil Q1 am Russbach im Herbst 2004 und im Frühjahr 2006	127
Anhang 10: Sieblinien des Einbaumaterials und der Deckschicht im Profil Q1 am Russbach	129
Anhang 11: Berechnungsbeispiel am Profil Q1	130
Anhang 12: Rückrechnung von ks_{so} anhand von verschiedenen Annahmenkombinationen	137

Anhang 1

Typische äquivalente Sandrauheiten k_s (mm) bei verschiedenen Wandungsarten

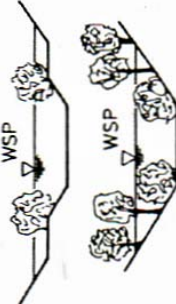
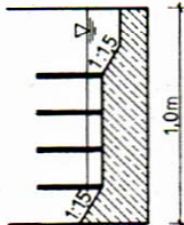
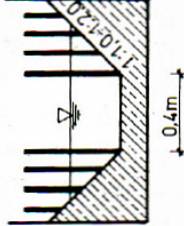
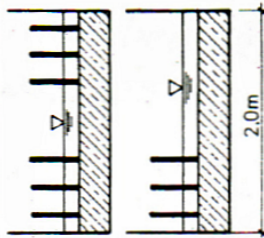
[DVWK, 1991]

Einzelrauheiten	k_s in mm
Ebene Fließgewässersohle	
– aus Sand oder Kies	$d_{k,90}$
– Grobkies bis Schotter	60 bis 200
– schwere Steinschüttung	200 bis 300
– Sohlenpflasterung	30 bis 50
Grenzbedingung für Einzelrauheiten: $k_s \leq 0,45 r_{hy}$	
Unebene Fließgewässersohle	
– mit Riffeln ($l_T < 0,3 \text{ m}$; $h_T < 0,05 \text{ m}$)	h_T (Höhe des Transportkörpers)
	
– mit Dünen ($l_T < 2 \pi h$; $h_T < 0,06 l_T$)	$h_T = h/6$ bis $h/3$
Vorländer und Böschungen mit	
– Ackerboden	20 bis 250
– Ackerboden mit Kulturen	250 bis 800
– Waldboden	160 bis 320
– Rasen	60
– Steinschüttung 80/450 mit Gras überwachsen	300
– Gras	100 bis 350
– Gras und Stauden	130 bis 400
– Rasengittersteine	15 bis 30
Wände aus	
– Ziegelmauerwerk	2 bis 8
– Beton glatt	1 bis 6
– Beton rau	6 bis 20
– Bruchstein	15 bis 20
– rauhe Natursteinmauer	80 bis 100
– Stahlspundwand je nach Profiltiefe	20 bis 100

Anhang 2

Übersicht über die Untersuchungen des DFG-Programmes zur Bestimmung des Einflusses von Vegetation im Hinblick auf die Interaktion in gegliederten Gerinnen

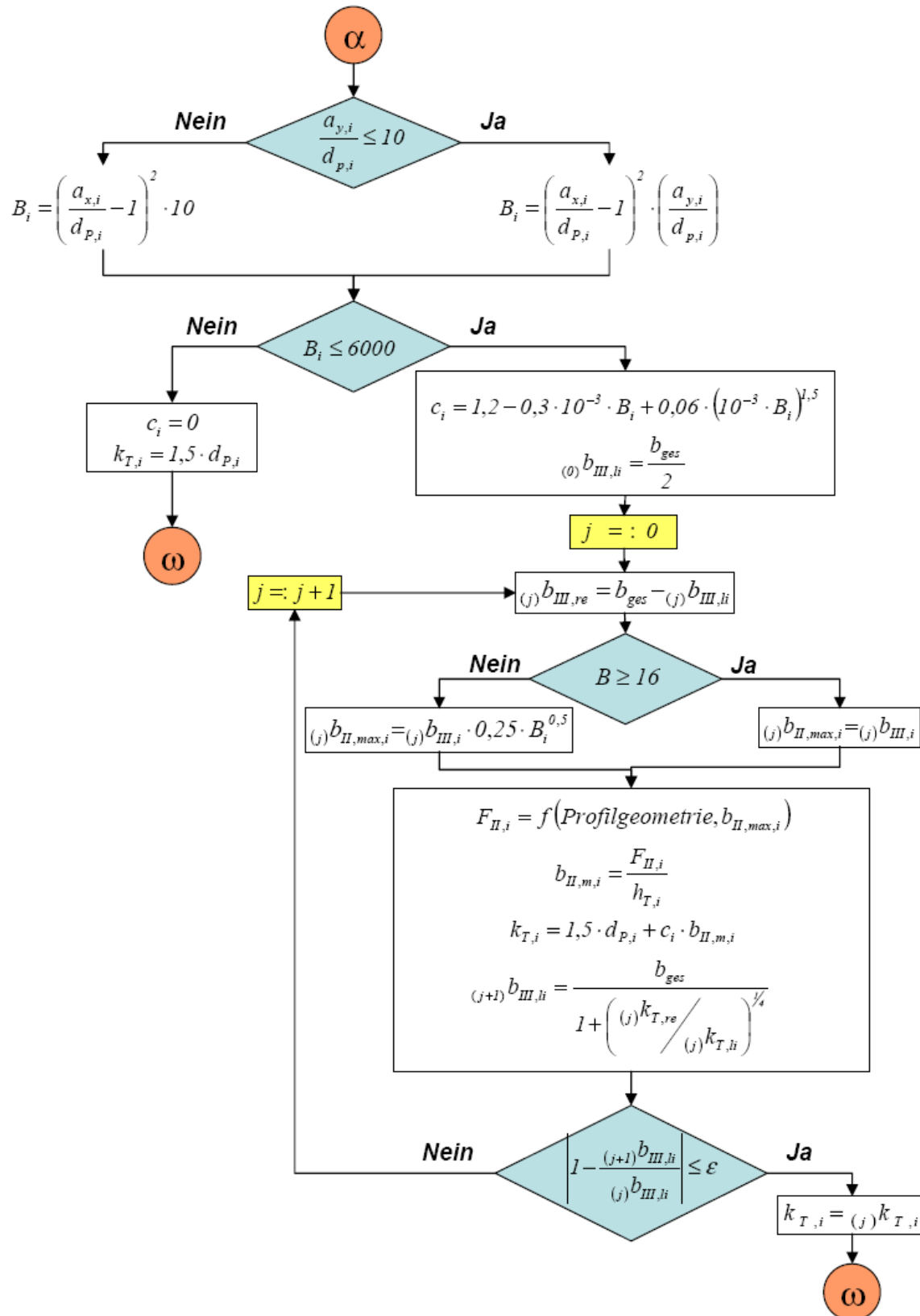
[DFG, 1987]

	U Hannover	TH Aachen	TU Braunschweig	TH Darmstadt
Thema	Der Einfluß biologischer Maßnahmen auf den Abflußwiderstand und die Abflußgeometrie offener Gerinne - Naturmessungen -	Grundlagenuntersuchungen über den Einfluß von naturnahen Gewässerauflandmaßnahmen - Laboruntersuchungen -	Der Einfluß biologischer Maßnahmen auf den Abflußwiderstand und die Abflußgeometrie offener Gerinne - Laboruntersuchungen -	Auswirkungen von einseitigen Uferbewuchs auf den Abflußvorgang - Laboruntersuchungen -
Abflußquerschnitt				
variable Parameter	Gefälle, Abfluß, Modellvegetation (Art, Anordnung, Dichte), Verhältnisse Vorland-/Mittelwasserbetriebe	Gefälle, Abfluß, Modellvegetation (Art, Anordnung, Dichte), Verhältnisse Vorland-/Mittelwasserbetriebe	Gefälle, Abfluß, Modellbewuchs (Art, Anordnung, Dichte)	Gefälle, Abfluß, Art des Bewuchses, Verhältnisse Wasserspiegelsbreite/Wassertiefe
gemessene Parameter	Geschwindigkeiten (Isotachenepläne), Wassertiefen, Wasserspiegelgefälle, Bewuchskenngrößen (d , a , a_z)	Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsverteilung, Wassertiefen, Turbulenzen, turbulente Schubspannungen, Sohlachubspannungen	Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsverteilung, Wassertiefen	Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsverteilung, Sohlchubspannungen und Sohlchubspannungsverteilung, Wassertiefen
Untersuchungen	Widerstandsverhalten des Bewuchses in Naturgerinnen (gegliedert und kompakt)	Abflußbehinderung durch Vegetation auf dem Vorland, Interaktion Hauptgerinne/Vorland	Widerstandsverhalten von Vegetation auf Böschungen, Interaktion Mittelquerschnitt/Böschungsbereich	Widerstandsverhalten, Interaktion, Erosionsangriffe
Ziele	Überprüfung der am Modell abgeleiteten Ergebnisse und Berechnungsverfahren an den wirklichen Verhältnissen	1- und 2-dimensionale Verfahren für die Abflußberechnung in gegliederten Querschnitten mit Vegetation	Berechnungs- und Bemessungsverfahren für den Wasserabfluß in Gerinnen mit natürlich bewachsenen (bzw. bepflanzt) Uferböschungen	Erarbeitung von hydraulischen- und flußmorphologischen Grundlagen zur Entwicklung und Dimensionierung biologischer Flußversicherungen

Anhang 3

Struktogramm zur Berechnung der Trennflächenrauheit bei dem Mertens-Verfahren – Empfehlung nach INDLEKOFER (2003)

Eingabedaten : a_{xi} , a_{yi} , d_{pi} ($i = li$ bzw re), Profilgeometrie, Wasserspiegelhöhe W_{sp}



Anhang 4

Elemente des Querschnittsaufbaus am Russbach – Machfeldkanal Projekt

Laut dem technischen Bericht des Detailprojekts des Machfeldkanals (1988) wurde der Profilquerschnitt des Russbaches auf eine Abfuhrleistung von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt.

❖ Um diesen Durchfluss einhalten zu können und Überflutungen zu vermeiden, ist ein genügender Fließquerschnitt vorzusehen. Folgende Punkte sind zu beachten :

- genügender **Freibord**

→ Ein Freibord von 50 cm im normalen Zustand wurde am Russbach vorgesehen. (Im Fall einer Behinderung des Durchflusses von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ bei der Wehranlage 6 (s. Grundriss des gesamten Machfeldkanals im Anhang 5) hat ein Modellversuch gezeigt, dass der Freibord noch mindestens 30 cm im Rückstaubereich beträgt.)

- Anpassung der Querschnittsgeometrie an das vorhandene Gelände und an die zur Verfügung stehende **Grundfläche**

→ Das neu geplante Russbachprofil wurde an die schon vorhandenen Regulierungsdämme des Russbaches angepasst.

- Geeignete **Böschungssicherung** : je nach Beanspruchung (insbesondere Wasserspiegelschwankungen) und Neigung (bei steilen Böschungen, wenn der Böschungswinkel des Bodenmaterials überschritten wird, ist eine Böschungsverfestigung vorzusehen).

→ Die steilen Böschungen (1:2,75) wurden durch Ingenieurbiologische Maßnahmen gesichert (und durch Steinpflasterung bei den Feldwegbrücken).

❖ Eine **Abdichtung** der Gerinnesohle ist auch vorzusehen. Dies findet Verwendung bei :

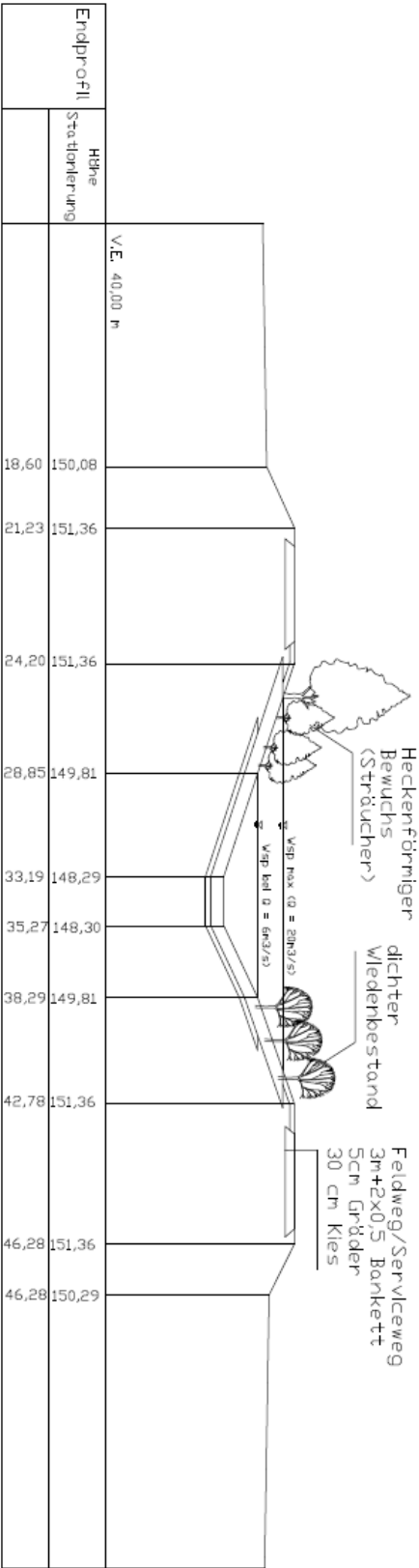
- dem Grundwasserschutz im Fall einer unfallsähnlichen raschen Verschmutzung des Gewässers
- der Verminderung der Versickerungsverluste

→ Zur Abdichtung der Sohle des Russbaches wurden zwei Dichtungstypen verwendet: Foliendichtung oder mineralische Dichtung (Ton). Kostenkriterien entschieden über die eine oder die andere Lösung für jeden Bauabschnitt. Zum Beispiel für der Planungsabschnitt H (km 9,630 bis 27,158):

- o Von km 9,630 bis 14,675 wurde der Russbach mittels einer 1mm starken HDPE-Folie bis zum $6,3 \text{ m}^3/\text{s}$ – Wasserspiegelhöhe gedichtet.
- o Von km 14,675 bis 27,158 wurde eine mineralische Dichtung verwendet. Zur Bauzeit dieses Abschnittes war Wiener Tegel ($k = 10^{-8} \text{ m/s}$) günstig vorhanden (Aushubmaterial Ostautobahn A4, Baustelle Parndorf). Eine 20 cm stark Tegelschicht wurde eingebaut und gewalzt. Eignungsüberprüfungen erfolgten vor dem Einbau. Während des Einbaues wurden laufend Verdichtungskontrollen durchgeführt.

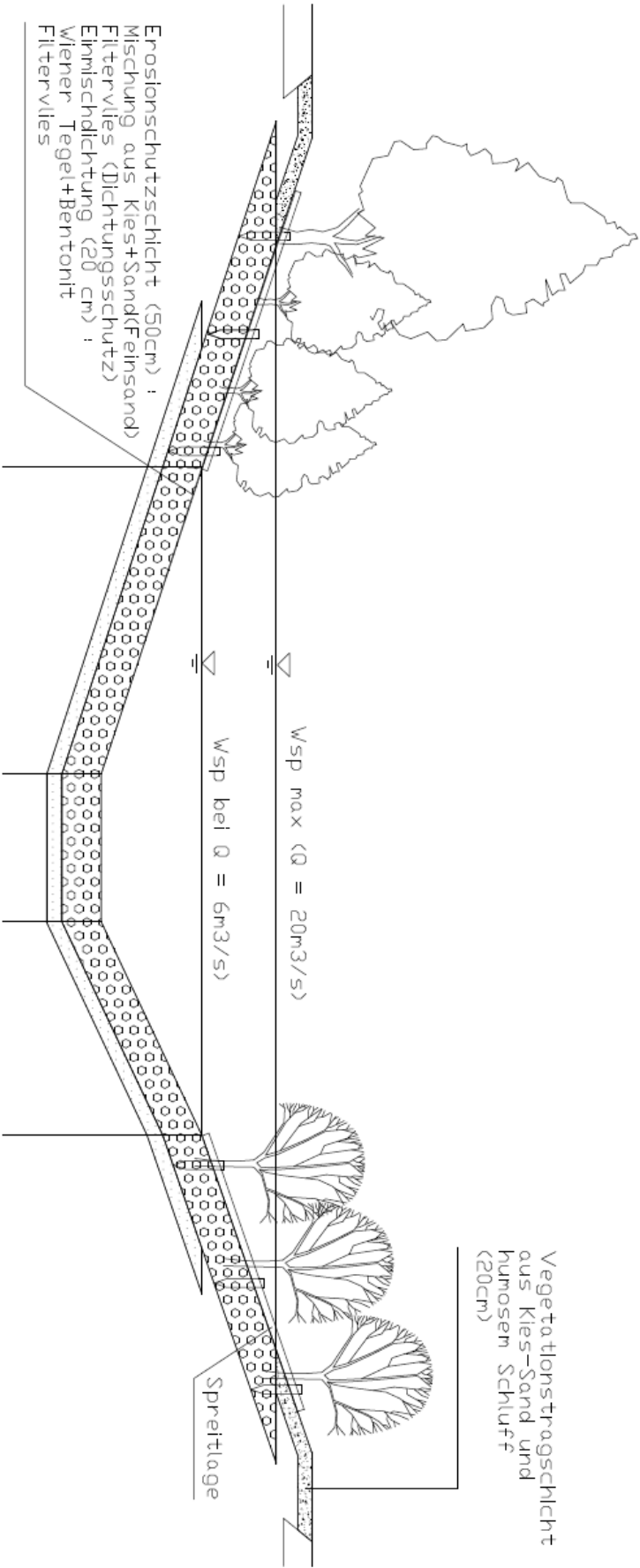
- o In den beiden Fällen wurde zum Schutz gegen mechanische Beschädigungen unterhalb und oberhalb der Dichtungsschicht Filtervlies verlegt.
- o Als Erosionsschutz wurde eine 50 cm stark Kies-Sand Schicht an der Oberfläche verlegt und gewalzt.

(s. Details über die Böschungsbewuchsanordnung und die mineralische Dichtung im folgenden Bild : geplantes Querprofil am Russbach – km 23,8+76 (Q1))



geplantes Querprofil am Russbach – km 23,8+76 (Q1)
[erstellt aus den charakteristischen Profilen des Detailprojektes MACHFELKANAL – planungsabschnitt H]

Detail:



Anhang 5

Machfeldkanal – Übersichtplan (erste Hälfte von Einlauf in Langenzersdorf bis Leopoldsdorf)

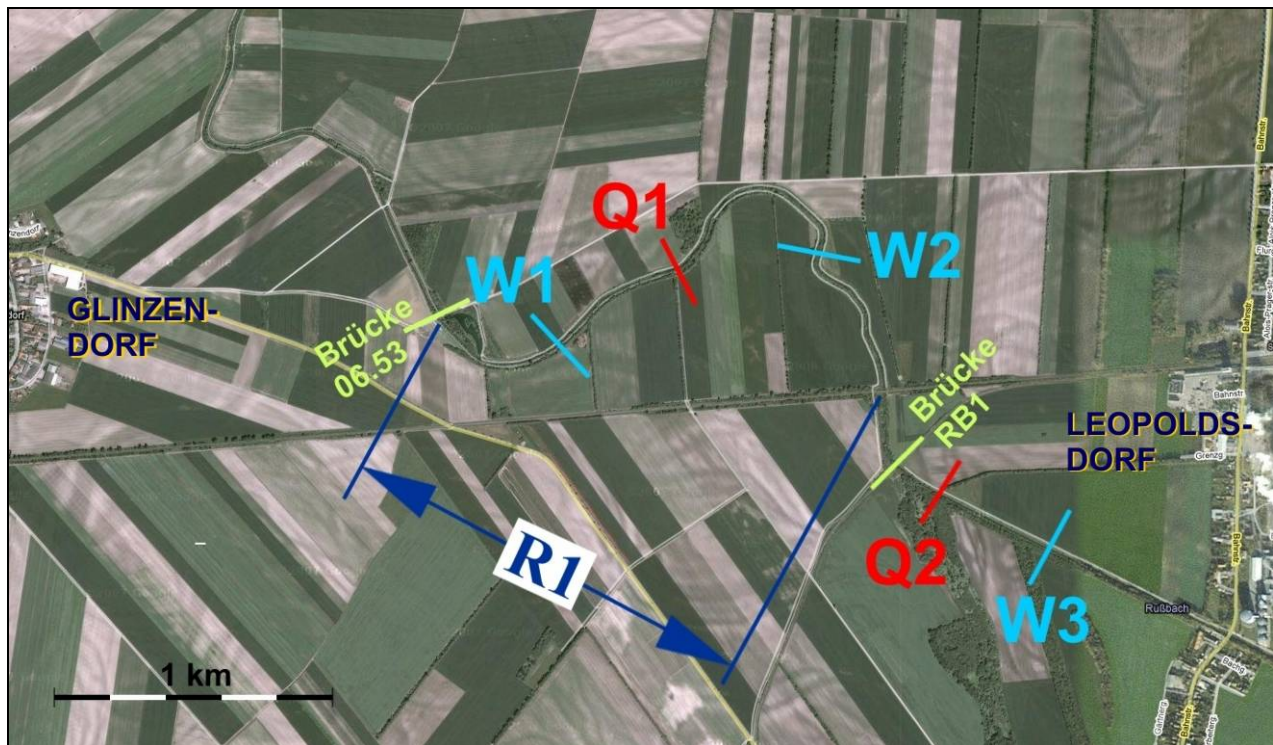
[aus Machfeldkanal Radwanderwegplan]



Anhang 6

Detail der Strecke R1 am Russbach

[Foto aus Google Maps]



Anhang 7

Wasserstandmessungen der Machfeldkanalbetriebsgesellschaft und des hydraulischen Dienstes NÖ

Wasserstandsmessungen - tatsächliche Messwerte (entsprechen nicht exakt den angegebenen Durchflüssen)											
Profil	Station (km)	Herbst 2004			Frühjahr 2005			Herbst 2005			11/10/2005
		20/10/2004 H04 - 10m³/s	18/10/2004 H04 - 8m³/s	28/10/2004 H04 - 6m³/s	08/04/2005 F05 - 10 m³/s	08/04/2005 F05 - 8m³/s	13/04/2005 F05 - 6m³/s	30/03/2005 F05 - 4m³/s	05/10/2005 H05 - 10m³/s	03/10/2005 H05 - 8m³/s	
P82	36,802										
RMB0-RB	35,876										
W8	34,758	155,26	154,99	154,68	155,19	154,86	154,66		155,31	154,98	154,67
P73	33,535	154,78	154,51	154,23	154,62	154,40	154,32	154,06	154,81	154,48	154,21
ausgängerstei	33,333										
07,51	28,183	152,46	152,11	151,84	152,38	152,07	151,90	151,67	152,47	152,16	151,83
06,53	24,906	151,21	150,76	150,44	150,83	150,54	150,43	150,03	150,91	150,63	150,32
W1	24,369	150,89	150,53	150,28	150,67	150,38	150,16	149,87	150,75	150,47	150,16
Q1	23,876	150,64	150,30	150,00	150,40	150,09	149,90	149,62	150,49	150,70	149,91
W2	23,111	150,31	149,99	149,76	150,16	149,87	149,65	149,39	150,25	149,97	149,67
RB 1	22,188	149,88	149,60	149,35	149,85	149,55	149,43	149,08	149,92	149,64	149,34
Q2	22,005	149,76	149,49	149,28	149,74	149,35	149,23	148,98	149,79	149,51	149,22
W3	21,419	149,46	149,21	148,99	149,42	149,14	148,94	148,67	149,58	149,29	149,01
03,51	20,841	149,11	148,88	148,66	149,07	148,80	148,70	148,34	149,10	148,82	148,56
Q3	20,127	148,81	148,54	148,32	148,74	148,46	148,25	147,98	148,79	148,52	148,24
W4	19,727	148,64	148,38	148,13	148,55	148,26	148,07	147,82	148,63	148,38	148,08
00,53	19,085	148,31	148,03	147,81	148,22	147,95	147,74	147,48	148,29	148,01	147,75
W5	18,706	148,13	147,87	147,66	148,06	147,79	147,58	147,30	148,11	147,83	147,57
W6	18,052	148,02	147,78	147,53	147,97	147,69	147,46	147,18	148,02	147,73	147,48
RB 16,97	16,974	147,63	147,32	147,11	147,47	147,20	147,06	146,78	147,49	147,21	146,95
Q4	16,881	147,63	147,29	147,07	147,39	146,97	146,87	146,73	147,47	147,18	146,92
RB 16,47	16,468	147,50	147,20	146,97	147,33	147,06	146,90	146,65	147,31	147,03	146,77
Q5	15,871	147,08	146,75	146,49	146,94	146,89	146,43	146,20	147,01	146,71	146,46
RB 15,82	15,804	147,03	146,74	146,48	146,96	146,68	146,52	146,20	147,01	146,71	146,44
98,51	15,286	146,71	146,44	146,10	146,72	146,42	146,28	145,87	146,80	146,48	146,18
Q6	13,141	145,90	145,67	145,45	145,90	145,81	145,44	145,15	145,97	145,70	145,44
W7	12,616	145,68	145,46	145,29	145,67	145,45	145,27	145,02	145,80	145,55	145,31
Q7	12,068	145,35	145,12	144,98	145,33	145,11	144,96	144,74	145,35	145,14	144,93
94,51	11,263	144,84	144,74	144,63	144,85	144,74	144,71	144,54	144,88	144,74	144,63
HD Engel	4,100										

aus dem File der Machfeldkanalbetriebsgesellschaft - Übersicht_Spiegellinien.xls

Anhang 8

Durchflussmessungen der Machfeldkanalbetriebsgesellschaft

Q-Messungen (Flügel) - auf Plausibilität korrigierte Messwerte								
Profilbezeichnung	Station	Herbst 2004		Frühjahr 2005		Herbst 2005		
		20/10/2004 H04 - 10m³/s	28/10/2004 H04 - 6m³/s	06/04/2005 F05 - 10 m³/s	08/04/2005 F05 - 6m³/s	13/04/2005 F05 - 4m³/s	05/10/2005 H05 - 10m³/s	11/10/2005 H05 - 6m³/s
LSX (DFLRB)	37,160							
W8	34,758	10,7	6,3					
P73	33,535							
Holzsteg Parb.	33,333							
07,51	28,183							
Wehr 6	26,970	10,17	6,30	10,37	6,09	4,10	10,60	6,16
06,53	24,906							
W1	24,359	9,52	5,98	10,18	5,90	4,13	10,51	6,03
Q1	23,876							
W2	23,111	9,42		10,00			10,37	
RB 1	22,188							
Q2	22,005	9,27	5,80	9,90	5,94	4,05	10,22	6,02
W3	21,419						10,15	
03,51	20,841							
Q3	20,127	9,28	5,80	9,81	5,76	4,02	9,99	5,93
W4	19,727						9,89	
00,53 HD Pegel	19,085							
W5	18,706	9,30	5,87				9,80	5,95
W6	18,052							
RB 16,97	16,974							
Q4	16,881							
RB 16,47	16,468			9,73				
Q5	15,871							
RB 15,82	15,804						9,56	
98,51	15,286							
Q6	13,141	8,70	5,78	9,32	5,69	3,92	9,40	5,95
W7	12,616	8,70					9,00	
Q7	12,068							
94,51	11,263	8,70					8,85	
Pegel Engelh.	4,100	8,70		9,03	5,69	3,96		
gelb hinterlegte Felder bedeuten, dass ein Flügelmesswert existiert								
aus dem File der Machfeldanaltriebsgesellschaft - Hydrologische_LS.xls								

gelb hinterlegte Felder bedeuten, dass ein Flügelmesswert existiert

aus dem File der Machfeldkanalbetriebsgesellschaft - Hydrologische_LS.xls

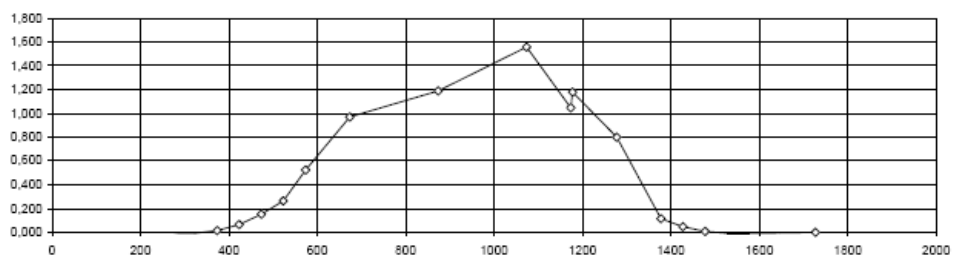
Anhang 9

Stangenmessungen im Profil Q1 am Russbach im Herbst 2004 und im Frühjahr 2006

[Datei von der Machfeldkanalbetriebsgesellschaft bekommen]

Gerinne: RB	6-Punkt Stangenmessung										Flomate Filter FPA Meßdauer pro Pkt.:		t (s) = 20				
Meßstelle: Q1																	
Meßteam: HW, SA																	
Datum: 19/10/2004																	
Uhrzeit:											Korrekturfaktor für Schrägmessung:		k = 1,000				
h Stangenwert Wsp; s.... Schlammstärke t Wassertiefe; dt Sohlabstand z=Spornhöhe bei fester Sohle=4cm X Flangel=4cm, X Flomate=2cm h = s + t bzw. h = s + dt												Abfluß 8,999 m³/s Fläche 19,789 m² mittl. Geschwindigkeit 0,455 m/s		Jede Messlotrechte beginnt mit der Wsp.-messung und ist durch eine Pseudomessung auf Schlammhöhe mit n = v = 0 abzuschließen. Außerdem ist die Schlammhöhe manuell in die Spalte P einzutragen!!! Bei Flomatemessungen ist die Geschwindigkeit direkt unten ab Zeile 42 in die Spalten D, F, ... einzugeben.			
Feld:	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	3		
	A-Ufer	h	Wsp.-4cm		2. Messung		3. Messung		4. Messung		5. Messung		6. Messung		Schlamm	Teilfläche	
	cm	cm	h U/30°		h U/30°		h U/30°		h U/30°		h U/30°		h U/30°		s		
1	1727																
2	1647	25,7	21,7		12,7		3,7		2,7							0,103	
3	1577	49,7	45,7		29,7		19,7		9,7							0,264	
4	1527	64,7	60,7		47,7		32,7		17,7		9,7		2,7			0,286	
5	1477	72,7	68,7		52,7		32,7		12,7		2,7					0,344	
6	1427	74,7	70,7		51,7		31,7		12,7		2,7					0,369	
7	1377	79,7	75,7		57,7		35,7		14,7		2,7					0,386	
8	1277	145,7	141,7		117,7		89,7		64,7		34,7		9,7			1,127	
9	1177	173,7	169,7		135,7		100,7		70,7		40,7		15,7			1,567	
10	1173	162,7	158,7		128,7		98,7		68,7		38,7		10,7			0,666	
11	1073	202,7	198,7		158,7		118,7		78,7		38,7		10,7			1,827	
12	873	234,7	230,7		180,7		130,7		80,7		30,7		8,7			4,374	
13	673	202,7	198,7		158,7		118,7		78,7		38,7		12,7			4,374	
14	573	153,7	149,7		119,7		89,7		59,7		29,7		9,7			1,782	
15	523	118,7	114,7		90,7		66,7		42,7		18,7		6,7			0,681	
16	473	90,7	86,7		66,7		46,7		26,7		6,7		2,7			0,524	
17	423	68,7	64,7		48,7		32,7		20,7		6,7		2,7			0,399	
18	373	63,7	59,7		38,7		18,7		4,7		2,7					0,331	
19	323	55,7	51,7		36,7		21,7		6,7		2,7					0,299	
20	277	34,7	30,7		17,7		5,7		2,7							0,208	
21																0,481	
22																-	
																19,789	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o			
Geschwindigkeiten (m/s)																[m³/s.m]	[m³/s]
Lotrechte		Wsp.		2. Messung		3. Messung		4. Messung		5. Messung		6. Messung		q _l		Q _l	
1	1727														0,000		
2	1647	-0,02	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,005	-0,002	
3	1577	-0,02	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-0,008	-0,005	
4	1527	-0,01	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-	-0,01	-	-	-	-	-0,008	-0,004	
5	1477	0,05	0,04	0,04	-0,00	-0,00	-0,03	-	-	-	-	-	-	-	0,007	0,000	
6	1427	0,03	0,15	0,15	0,05	0,05	0,02	0,02	-	-	-	-	-	-	0,047	0,013	
7	1377	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,13	0,13	-	-	-	-	-	-	0,116	0,041	
8	1277	0,48	0,60	0,60	0,63	0,63	0,53	0,53	0,59	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,801	0,459	
9	1177	0,69	0,78	0,78	0,85	0,85	0,82	0,82	0,56	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	1,180	0,991	
10	1173	0,58	0,70	0,70	0,82	0,82	0,75	0,75	0,54	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	1,048	0,045	
11	1073	0,72	0,85	0,85	0,94	0,94	0,87	0,87	0,71	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	1,557	1,303	
12	873	0,45	0,53	0,53	0,57	0,57	0,54	0,54	0,46	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	1,189	2,746	
13	673	0,45	0,58	0,58	0,53	0,53	0,50	0,50	0,43	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,969	2,158	
14	573	0,32	0,48	0,48	0,33	0,33	0,37	0,37	0,28	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,523	0,746	
15	523	0,21	0,28	0,28	0,19	0,19	0,25	0,25	0,25	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,265	0,197	
16	473	0,21	0,18	0,18	0,18	0,18	0,21	0,21	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,151	0,104	
17	423	0,11	0,15	0,15	0,08	0,08	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,065	0,054	
18	373	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	-0,00	-0,00	-	-	-	-	-	-	0,014	0,020	
19	323	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-	-	-	-	-	-	-0,008	0,002	
20	277	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,006	-0,003	
21							-	-	-	-	-	-	-	-	0,000	0,137	
22							-	-	-	-	-	-	-	-	0,000	0,000	

Distance (m)	Velocity (m/s)
350	0.05
400	0.10
450	0.15
500	0.25
550	0.45
600	0.65
650	0.95
700	1.15
750	1.25
800	1.35
850	1.45
900	1.55
950	1.60
1000	1.55
1050	1.45
1100	1.25
1150	1.05
1200	0.85
1250	0.65
1300	0.45
1350	0.25
1400	0.10
1450	0.05
1500	0.02
1550	0.01
1600	0.00
1650	0.00
1700	0.00
1750	0.00
1800	0.00
1850	0.00
1900	0.00
1950	0.00
2000	0.00



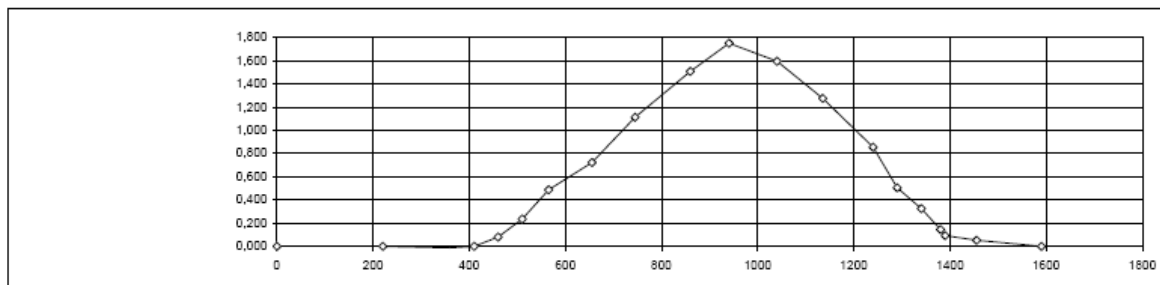
Gerinne: RB	6-Punkt Stangenmessung	Flomate	t (s) = 20
Meßstelle: Q1		Filter FPA	
Meßteam: HW, SA		Meßdauer pro Pkt.:	
Datum: 5/4/2005		Korrekturfaktor für Schrägmessung: k = 1,000	
Uhrzeit:			
h Stangenwert Wsp; s.... Schlammstärke t Wassertiefe; dt Sohlabstand z=Spornhöhe bei fester Sohle=4cm X Flügel=4cm, X Flomate=2cm h = s + t bzw. h = s + dt		Abfluß 10,003 m³/s Fläche 16,219 m² mittl. Geschwindigkeit 0,617 m/s	
Jede Messlotrechte beginnt mit der Wsp.-messung und ist durch eine Pseudomessung auf Schlammhöhe mit n = v = 0 abzuschließen. Außerdem ist die Schlammhöhe manuell in die Spalte P einzutragen!!! Bei Flomatmessungen ist die Geschwindigkeit direkt unten ab Zeile 42 in die Spalten D, F, ... einzugeben.			

Feld:	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	3	
	A-Ufer cm	h cm	Wsp.-4cm h Abstich		2. Messung h Abstich		3. Messung h Abstich		4. Messung h Abstich		5. Messung h Abstich		6. Messung h Abstich		Schlamm s	Teilfläche
1	220															
2	360	43,7	39,7	-4	31,7	-12	23,7	-20	15,7	-28	7,7	-36				0,30
3	410	52,7	48,7	-4	38,7	-14	28,7	-24	18,7	-34	8,7	-44				0,24
4	460	61,7	57,7	-4	48,7	-13	36,7	-25	24,7	-37	12,7	-49	7,7	-54		0,28
5	510	95,7	91,7	-4	74,7	-21	55,7	-40	36,7	-59	17,7	-78	6,7	-89		0,39
6	565	117,7	113,7	-4	89,7	-28	66,7	-51	44,7	-73	21,7	-96	6,7	-111		0,58
7	655	131,7	127,7	-4	102,7	-29	77,7	-54	51,7	-80	26,7	-105	6,7	-125		1,12
8	745	164,7	160,7	-4	132,7	-32	99,7	-65	67,7	-97	34,7	-130	6,7	-158		1,33
9	860	205,7	201,7	-4	167,7	-38	126,7	-79	91,7	-114	47,7	-158	6,7	-199		2,09
10	940	220,7	216,7	-4	178,7	-42	134,7	-86	90,7	-130	46,7	-174	6,7	-214	6	1,68
11	1040	214,7	210,7	-4	168,7	-46	126,7	-88	84,7	-130	42,7	-172	6,7	-208		2,17
12	1135	198,7	194,7	-4	157,7	-41	118,7	-80	78,7	-120	39,7	-159	6,7	-192		1,96
13	1240	153,7	149,7	-4	121,7	-32	91,7	-62	61,7	-92	31,7	-122	6,7	-147		1,85
14	1290	111,7	107,7	-4	85,7	-26	64,7	-47	42,7	-69	21,7	-90	4,7	-107	3	0,65
15	1340	91,7	87,7	-4	71,7	-20	54,7	-37	36,7	-55	19,7	-72	6,7	-85		0,50
16	1380	69,7	65,7	-4	53,7	-16	41,7	-28	29,7	-40	17,7	-52	6,7	-63	4	0,31
17	1390	54,7	50,7	-4	39,7	-15	28,7	-26	17,7	-37	6,7	-48			4	0,05
18	1455	48,7	44,7	-4	34,7	-14	14,7	-34	6,7	-42						0,32
19	1590															0,32
20																
21																
22																

hauteur de
profil du
mesure de
fond
vitesse
(lignes du
dessous)

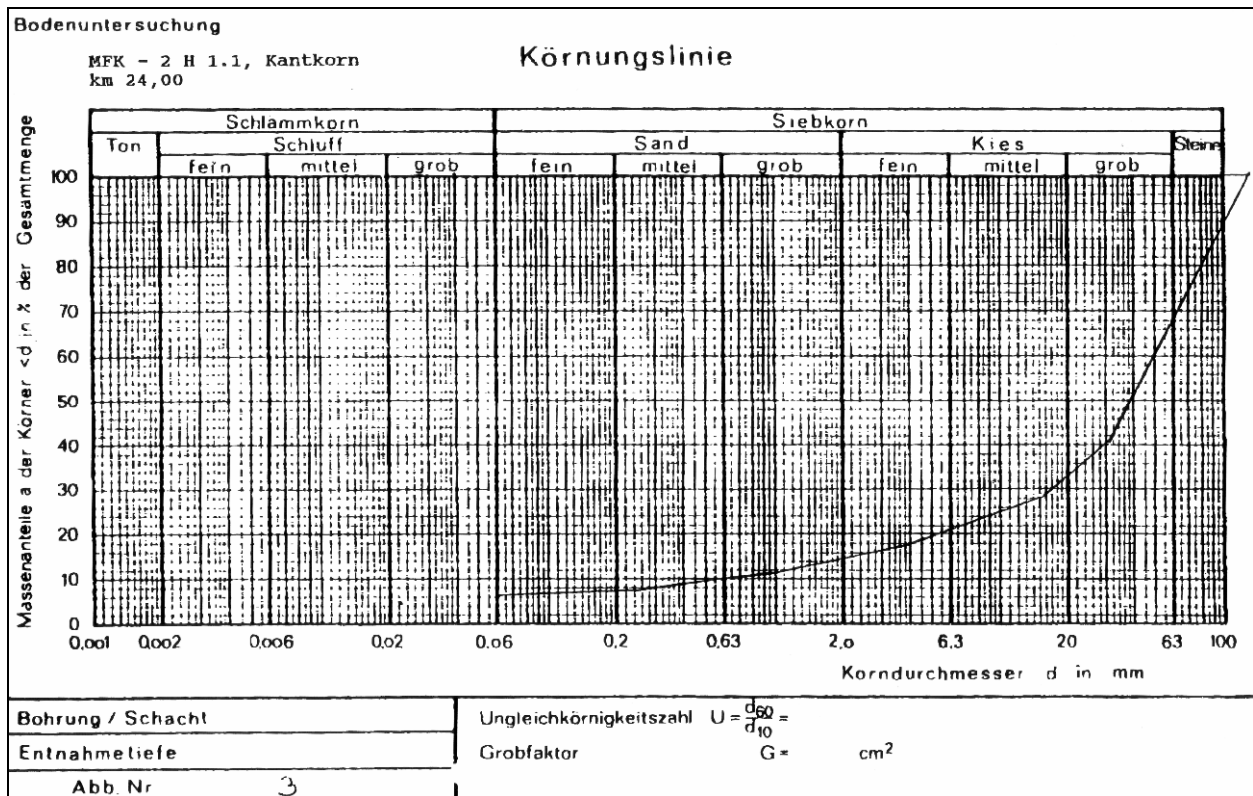
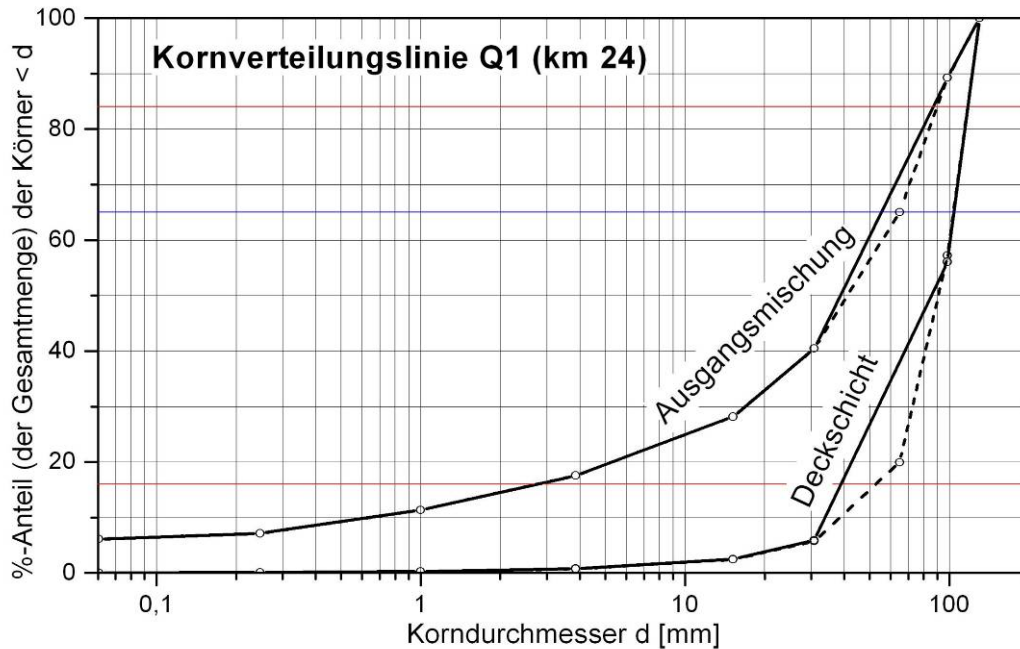
a b c d e f g h i j k l m n o 16,219

Geschwindigkeiten (m/s)														[m³/s.m]	[m³/s]		
Lotrechte	WSP.	v	Höhe	v	Höhe	v	Höhe	v	Höhe	v	Höhe	v	Höhe	qI	QI		
1	220	150,40	-	150,40	-	150,40	-	150,40	-	150,40	-	150,40	-	0,000			
2	360	150,40	-0,03	150,36	-0,04	150,28	-0,04	150,20	-0,02	150,12	-0,04	150,04	-	150,40	-0,013	-0,009	
3	410	150,40	0,02	150,36	0,01	150,26	0,01	150,16	-0,01	150,06	-0,02	149,96	-	150,40	-0,001	-0,003	
4	460	150,40	0,19	150,36	0,07	150,27	0,19	150,15	0,16	150,03	0,13	149,91	0,06	149,86	0,080	0,020	
5	510	150,40	0,28	150,36	0,29	150,19	0,21	150,00	0,30	149,81	0,24	149,62	0,16	149,51	0,236	0,079	
6	565	150,40	0,42	150,36	0,58	150,12	0,39	149,89	0,40	149,67	0,39	149,44	0,30	149,29	0,487	0,159	
7	655	150,40	0,63	150,36	0,62	150,11	0,66	149,86	0,55	149,60	0,46	149,35	0,38	149,15	0,723	0,544	
8	745	150,40	0,68	150,36	0,79	150,08	0,76	149,75	0,77	149,43	0,55	149,10	0,48	148,82	1,113	0,826	
9	860	150,40	0,84	150,36	0,88	150,02	0,87	149,61	0,79	149,26	0,68	148,82	0,35	148,41	1,508	1,507	
10	940	150,40	0,86	150,36	0,95	149,98	0,90	149,54	0,85	149,10	0,79	148,66	0,28	148,26	1,750	1,303	
11	1040	150,40	0,83	150,36	0,86	149,94	0,89	149,52	0,85	149,10	0,58	148,68	0,33	148,32	1,596	1,673	
12	1135	150,40	0,72	150,36	0,79	149,99	0,75	149,60	0,73	149,20	0,46	148,81	0,31	148,48	1,274	1,363	
13	1240	150,40	0,55	150,36	0,63	150,08	0,71	149,78	0,54	149,48	0,51	149,18	0,37	148,93	0,856	1,118	
14	1290	150,40	0,37	150,36	0,46	150,14	0,53	149,93	0,56	149,71	0,49	149,50	0,25	149,33	0,504	0,340	
15	1340	150,40	0,31	150,36	0,36	150,20	0,41	150,03	0,46	149,85	0,36	149,68	0,24	149,55	0,325	0,207	
16	1380	150,40	0,19	150,36	0,30	150,24	0,27	150,12	0,31	150,00	0,17	149,88	0,03	149,77	0,145	0,094	
17	1390	150,40	0,18	150,36	0,18	150,25	0,18	150,14	0,21	150,03	0,15	149,92	-	150,40	0,093	0,012	
18	1455	150,40	0,08	150,36	0,10	150,26	0,11	150,06	0,15	149,98	0,11	150,40	-	150,40	0,053	0,047	
19	1590	150,40	-	150,40	-	150,40	-	150,40	-	150,40	-	150,40	-	150,40	-	0,000	0,036
20	0															0,000	0,000
21																0,000	0,647
22																0,000	0,000



Anhang 10

Sieblinien des Einbaumaterials und der Deckschicht im Profil Q1 am Russbach



Anhang 11

Berechnungsbeispiel am Profil Q1

Kstges* Rückrechnung mit $Q_{nom} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ - INITIALER PARAMETERZUSTAND

Profil: Q1 (H4)

$Q_{gem} [\text{m}^3/\text{s}]$: 9,42
 WSp [m]: 10,00
 Gefälle [‰]: 0,4890
 J = 0,00049

F [m²] = 17,430
 U [m] = 12,483
 R [m] = 1,396

$Kst_{ges}^* [\text{m}^{1/3}/\text{s}]$ = 19,56

$\lambda_{ges}^*, \text{init} = 0,19396$

$\alpha = 2,077$
 $\beta = 0,433$

bewuchsanschlagslinie

rechts: 14,77
 links: 4,46

Trennflächenfusspunkte laut MFK
 Wasserspiegelanschlagslinie

lfdNr.	y	z	abs(Δy)	abs(Δz)	WSp-z	ΔF	ΔU
0	0	10			0,000		
			1,000	0,130		0,065	1,008
1	1	9,87			0,130		
			1,770	0,220		0,425	1,784
2	2,77	9,65			0,350		
			0,460	0,210		0,209	0,506
3	3,23	9,44			0,560		
			0,500	0,080		0,300	0,506
4	3,73	9,36			0,640		
			0,500	0,050		0,333	0,502
5	4,23	9,31			0,690		
			0,230	0,100		0,170	0,251
6	4,46	9,21			0,790		
			0,270	0,120		0,230	0,295
7	4,73	9,09			0,910		
			0,500	0,280		0,525	0,573
8	5,23	8,81			1,190		
			0,500	0,350		0,683	0,610
9	5,73	8,46			1,540		
			1,000	0,490		1,785	1,114
10	6,73	7,97			2,030		
			2,000	0,320		4,380	2,025
11	8,73	7,65			2,350		
			2,000	0,320		4,380	2,025
12	10,73	7,97			2,030		
			1,040	0,290		1,960	1,080
13	11,77	8,26			1,740		
			1,000	0,280		1,600	1,038
14	12,77	8,54			1,460		
			1,000	0,660		1,130	1,198
15	13,77	9,2			0,800		
			0,500	0,050		0,388	0,502
16	14,27	9,25			0,750		
			0,500	0,020		0,370	0,500
17	14,77	9,27			0,730		
			0,300	0,048		0,212	0,304
18	15,07	9,318			0,682		
			0,200	0,032		0,133	0,203
19	15,27	9,35			0,650		
			0,500	0,150		0,288	0,522
20	15,77	9,5			0,500		
			0,700	0,240		0,266	0,740
21	16,47	9,74			0,260		
			0,800	0,260		0,104	0,841
22	17,27	10			0,000		

Rauhigkeitsrückrechnung ($k_{s,so}$) mit $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ - initialer Parameterzustand**Profil:** Q1 (H04)**Annahmenkombination 1** **$Q_{gem} [\text{m}^3/\text{s}]$:** 5,98

F= 10,832

 $k_{s,so} [\text{m}] = 0,374$

WSp: 9,36

U= 11,203

Gefälle $[‰]$: 0,4000

Rhy= 0,967

J= 0,00040

 $\delta = 3,774$

bF = 10,31

Bewuchsanschlagslinie $\gamma = 14,349$

tw,m = 1,051

rechts: 14,77

 $\nu = 0,032$

links: 4,46

Trennflächenfusspunkte laut MFK**Wasserspiegelanschlagslinie**

lfdNr.	y	z	abs(Δy)	abs(Δz)	WSp-z	ΔF	ΔU
0	0	10			0,000		
			1,000	0,130		0,000	0,000
1	1	9,87			0,000		
			1,770	0,220		0,000	0,000
2	2,77	9,65			0,000		
			0,460	0,210		0,000	0,000
3	3,23	9,44			0,000		
			0,500	0,080		0,000	0,000
4	3,73	9,36			0,000		
			0,500	0,050		0,013	0,502
5	4,23	9,31			0,050		
			0,230	0,100		0,023	0,251
6	4,46	9,21			0,150		
			0,270	0,120		0,057	0,295
7	4,73	9,09			0,270		
			0,500	0,280		0,205	0,573
8	5,23	8,81			0,550		
			0,500	0,350		0,363	0,610
9	5,73	8,46			0,900		
			1,000	0,490		1,145	1,114
10	6,73	7,97			1,390		
			2,000	0,320		3,100	2,025
11	8,73	7,65			1,710		
			2,000	0,320		3,100	2,025
12	10,73	7,97			1,390		
			1,040	0,290		1,295	1,080
13	11,77	8,26			1,100		
			1,000	0,280		0,960	1,038
14	12,77	8,54			0,820		
			1,000	0,660		0,490	1,198
15	13,77	9,2			0,160		
			0,500	0,050		0,068	0,502
16	14,27	9,25			0,110		
			0,500	0,020		0,050	0,500
17	14,77	9,27			0,090		
			0,300	0,048		0,020	0,304
18	15,07	9,32			0,042		
			0,200	0,032		0,005	0,203
19	15,27	9,35			0,010		
			0,500	0,150		0,003	0,522
20	15,77	9,5			0,000		
			0,700	0,240		0,000	0,000
21	16,47	9,74			0,000		
			0,800	0,260		0,000	0,000
22	17,27	10			0,000		

Profil Q1- F05 - BERECHNUNG NACH MERTENS + ÜBERLAGERUNG NACH EINSTEIN-HORTON LAUT BVWK(91)

INITIALER PARAMETERZUSTAND

Gefälle J[‰] =	0,36000	0,00036 = J
WSp =	9,76000	

	y	z	abs(Δy)	abs(Δz)	WSp-z (wassertiefe) in m	ΔF	ΔU	Δb _(max)	F _(i,j)	0,70375 = Σ(F _(i,j))
0	0,00	10,00			0,000			4,46000	0,00000	
1	1,00	9,87	1,00	0,130	0,000	0,00000	1,00841	3,46000	0,09735	
2	2,77	9,65	1,77	0,220	0,110	0,09735	1,76362	1,69000	0,09890	
3	3,23	9,44	0,46	0,210	0,320	0,09890	0,50567	1,23000	0,18000	
4	3,73	9,36	0,50	0,080	0,400	0,18000	0,50636	0,73000	0,21250	
5	4,23	9,31	0,50	0,050	0,450	0,21250	0,50249	0,23000	0,11500	
6	4,46	9,21	0,23	0,100	0,11500	0,11500	0,25090	0,00000		
7	4,73	9,09	0,27	0,120	0,67	0,16470	0,29547			
8	5,23	8,81	0,50	0,280	0,950	0,40500	0,57306			
9	5,73	8,46	0,50	0,350	0,56250	0,56250	0,61033			
10	6,73	7,97	1,00	0,490	1,300	1,54500	1,11360			
11	6,73	7,65	2,00	0,320	2,110	3,90000	2,02544			
12	10,73	7,97	2,00	0,320	1,790	3,90000	2,02544			
13			1,04	0,290		1,71080	1,07968			
14	11,77	8,26			1,500					
15	12,77	8,54	1,00	0,280	1,220	1,36000	1,03846			
16	13,77	9,20	1,00	0,660	0,560	0,89000	1,19817			
17	14,27	9,25	0,50	0,050	0,510	0,26750	0,50249			
18	14,77	9,27	0,50	0,020	0,490	0,25000	0,50040			
19	15,07	9,32	0,30	0,048	0,442	0,13980	0,30382	0,00000	0,13980	
20	15,27	9,35	0,20	0,032	0,410	0,08520	0,20254	0,30000	0,08520	
21	15,77	9,50	0,50	0,150	0,260	0,16750	0,52202	0,50000	0,16750	
22	16,47	9,74	0,70	0,240	0,020	0,09800	0,74000	1,00000	0,09800	
23	17,27	10,00	0,80	0,260	0,000	0,00800	0,84119	1,70000	0,00800	
								2,50000		
								Δb _(max)	F _(i,j)	0,49850 = Σ(F _(i,j))

- Eingangsparameter einzufügen
- Trennfächen-stelle (Eingangsparameter auch)
- Werte selbst (bzw mit Makros) zu iterieren
- Ergebnis der Iteration
- weils Genauigkeitsprüfung bei der Iteration
- Zwischenparameter
- Ergebnisse

b _{ges} =	10,31000									
Schätzung	(1)b _{ges} =	4,45613	Iteration : (2)b _{ges} =	4,45613	Δb _{ges} =	0,00000	Genauigkeitsprüfung			

Bewuchparameter Böschung links:			
a _{yl} =	0,245	a _{yl} /d _{yl} =	10,00000
a _{yl} =	0,245	10 d _{yl} =	0,13000
d _{yl} =	0,013	für ay,il > 10 dp,il , ay,il/dp,il = 10	
		B _{yl} /1000 =	3,18485
		c _{yl} = f(B _{yl} /1000) =	0,58557

Trennfäche links			
h _{yl} =	0,550	b _{yl} =	4,46000
		b _{l,max,il} = b _{lil,il} =	4,45613
Berechnung von F _{yl}	F _{yl} = f(b _{lil,il} ; b _{lmax,il}) = Σ(F _(i,j)) =		0,70375
		b _{l,max,il} = F _{yl} /h _{yl} =	1,27955
		k _{yl} [m] =	0,76876
		λ _{yl,il} =	0,06680
		1/((2*log10(14,84*b _{lil,il} /k _{yl})) ² =	
	(annahme Rhy _{yl,il} = b _{lil,il})		

Bewuchparameter Böschung rechts:			
a _{yr} =	0,840	a _{yr} /d _{yr} =	8,75000
a _{yr} =	0,840	10 d _{yr} =	0,96000
d _{yr} =	0,096	für ay,re > 10 dp,re , ay,re/dp,re = 10	
		B _{re} /1000 =	0,52555
		c _{re} =	1,06520

Trennfäche rechts			
h _{yr} =	0,490	b _{yr} =	2,50000
		b _{l,max,re} = b _{lil,re} =	5,85387
Berechnung von F _{yr}	F _{yr} = f(b _{lil,re} ; b _{lmax,re}) = Σ(F _(i,j)) =		0,49850
		b _{l,max,re} = F _{yr} /h _{yr} =	1,01735
		k _{yr} [m] =	1,22767
		λ _{yr,re} =	0,08775
	(annahme Rhy _{yr,re} = b _{lil,il})		

Sohle	
k _{so} [m] =	0,080
(aus rückrechnung bei m3/s mit D.W.)	
U _{so} [m] =	10,96252

Gesamter Schlauch	
F _{ges} [m ²] =	14,9555
U _{ges} = U _{so} + h _{yl} + h _{yr} =	12,00252
Rhy _{ges} [m] =	1,24603

Berechnung der hydraulischen Radien nach Empfehlung von BVWK-91

für v _{max} [m/s] =	0,83011	neu v =	0,83006074
(1)Rhy _{yl} =	2,26490	(2)Rhy _{yl} =	2,26517013
neu Rhy _{T,il} = ((1)Rhy _{T,il} + (2)Rhy _{T,il})/2 =			2,2650351
	(2)F _{yl} =	1,24584	
	ΔRhy _{T,il} =	0,00027	
(1)Rhy _{yr} =	2,67504	(2)Rhy _{yr} =	2,6753683
neu Rhy _{T,re} = ((1)Rhy _{T,re} + (2)Rhy _{T,re})/2 =			2,67520641
	(2)F _{re} =	1,31093	
	ΔRhy _{T,re} =	0,00032	
(1)Rhy _{so} =	1,13101	(2)Rhy _{so} =	1,13109851
neu Rhy _{so} = ((1)Rhy _{so} + (2)Rhy _{so})/2 =			1,13105652
	(2)F _{so} =	12,39970	
	ΔRhy _{so} =	0,00003	
Summe :	(2)F _{ges} =	14,95647	
	ΔF _{ges} =	0,00097	

Überlagerung nach Empfehlung BVWK-91:

λ _{ges1} (aus D.W. mit vm und Rhy _{ges}) =	0,0511	λ _{ges2} (aus E.H.) =	0,0511
k _{st,ges1} [m ⁴ (1/3)/s] aus λ _{ges1} =	37,78	k _{st,ges2} [m ⁴ (1/3)/s] aus λ _{ges2} =	37,78
Q ₁ (aus vm) [m ³ /s] =	12,41	Q ₂ (aus D.W. mit λ _{ges2} aus E.H.) =	12,41

l _{mda} T _{il}	0,09287231
l _{mda} T _{re}	0,1096905
l _{mda} so	0,04637521

Profil Q1- F05 - BERECHNUNG NACH MERTENS + ÜBERLAGERUNG NACH EINSTEIN-HORTON LAUT INDLEKOER 03
INITIALER PARAMETERZUSTAND

Gefälle $J_{[0/100]}$ =	0,36000	0,00036 = J
Wsp =	9,76000	

	y	z	abs(Δy)	abs(Δz)	WSp-z (wassertiefe) in m	ΔF	ΔU	$\Delta b_{1,ITER,II}$	$F_{II,II}$	0,70375 = $\Sigma(F_{II,II})$
0	0,00	10,00			0,000			4,46000	0,00000	
1	1,00	9,87	1,00	0,130	0,000	0,00000	1,00841	3,46000	0,09735	
2	2,77	9,65	1,77	0,220	0,110	0,09735	1,78362	1,69000	0,09990	
3	3,23	9,44	0,46	0,210	0,320	0,09990	0,50567	1,23000	0,18000	
4	3,73	9,36	0,50	0,080	0,400	0,18000	0,50636	0,73000	0,21250	
5	4,23	9,31	0,50	0,050	0,450	0,21250	0,50249	0,23000	0,11500	
6	4,46	9,21	0,23	0,100	0,55	0,11500	0,25080	0,00000		
7	4,73	9,09	0,27	0,120	0,67	0,16470	0,29547			
8	5,23	8,81	0,50	0,280	0,950	0,40500	0,57306			
9	5,73	8,46	0,50	0,350	1,300	0,56250	0,61033			
10	6,73	7,97	1,00	0,490	1,790	1,54500	1,11360			
11	8,73	7,65	2,00	0,320	2,110	3,90000	2,02544			
12	10,73	7,97	2,00	0,320	1,790	3,90000	2,02544			
13			1,04	0,290		1,71080	1,07968			
14	11,77	8,26			1,500					
15	12,77	8,54	1,00	0,280	1,220	1,36000	1,03846			
16	13,77	9,20	1,00	0,660		0,89000	1,19817			
17	14,27	9,29	0,50	0,050	0,560	0,26750	0,50249			
18	14,77	9,27	0,50	0,020	0,510	0,25000	0,50040			
19	15,07	9,32	0,30	0,048	0,442	0,13980	0,30382	0,00000	0,13980	
20	15,27	9,39	0,20	0,032	0,410	0,08520	0,20254	0,30000	0,08520	
21	15,77	9,50	0,50	0,150	0,260	0,16750	0,52202	0,50000	0,16750	
22	16,47	9,74	0,70	0,240	0,020	0,09800	0,74000	1,00000	0,09800	
23	17,27	10,00	0,80	0,260	0,000	0,00800	0,84119	1,70000	0,00800	
								2,50000		
								$\Delta b_{1,ITER,II}$	$F_{II,II}$	0,49850 = $\Sigma(F_{II,II})$

- Eingangsparameter einzufügen
- Trennflächen-stelle (Eingangsparameter auch)
- Werte selbst (bzw mit Makros zu iterieren)
- Ergebnis der Iteration
- weils Genauigkeitsprüfung bei der Iteration
- Zwischenparameter
- Ergebnisse

b_{ges} =	10,31000									
Schätzung	(1) $b_{II,II}$ =	4,79497	Iteration : (2) $b_{II,II}$ =	4,79497	$b_{ges}/(1+(kTr, re/kT, II)^{(1/4)})$	$\Delta b_{II,II}$ =	0,00000	- Genauigkeitsprüfung		

Bewuchsparameter Böschung links:

$a_{k,l}$ =	0,245	$a_{p,l}/d_{p,l}$ =	10,00000	$a_{k,l}/d_{p,l} - 1$ =	17,84618
$a_{p,l}$ =	0,245	$10 \cdot d_{p,l}$ =	0,13000	$B_{II} = (ax_{II}/dp_{II} - 1)^2$	3 184,85207
$d_{p,l}$ =	0,013	für $ay_{II} > 10 \cdot dp_{II}$, $ay_{II}/dp_{II} = 10$		$(ay_{II}/dp_{II}) =$	3 184,85207
				$B_{II}/1000 =$	3,18485
				$c_k = f(B_{II}/100) =$	0,58557

Trennfläche links

$b_{T,l}$ =	0,550	$b_{II,l}$ =	4,46000	$b_{II,max,II} = b_{II,II} =$	4,79497
		$F_{II,l} = f(b_{II,II})$			
Berechnung von $F_{II,l}$		$b_{II,max,II} = \Sigma(F_{II,II})$			
			0,70375	$b_{II,max,II} = F_{II,II}/hT_{II} =$	1,27955

 (annahme
RhyT,II=bIII,II)

$k_{T,II}$ [m] =	0,76876
$\lambda_{T,II} =$	0,06455

Bewuchsparameter Böschung rechts:

$a_{k,r}$ =	0,840	$a_{p,r}/d_{p,r}$ =	8,75000	$a_{k,r}/d_{p,r} - 1$ =	7,75000
$a_{p,r}$ =	0,840	$10 \cdot d_{p,r}$ =	0,96000	$B_{re} =$	525,54688
$d_{p,r}$ =	0,096	für $ay_{re} > 10 \cdot dp_{re}$, $ay_{re}/dp_{re} = 10$		$B_{re}/1000 =$	0,52558
				$c_k =$	1,06520

Trennfläche rechts

$b_{T,r}$ =	0,490	$b_{II,r}$ =	2,50000	$b_{II,max,re} = b_{II,re}$	5,51503
		$F_{II,r} =$			
Berechnung von $F_{II,r}$		$f(b_{II,re}/b_{II,max,re})$		$b_{II,II,re} = b_{ges}-b_{II,II} =$	5,51503
		$= \Sigma(F_{II,II})$	0,49850	$b_{II,max,II} = F_{II,II}/hT_{II} =$	1,12783

 (annahme
Rhy,Tr,re=bIII,II)

$k_{T,r}$ [m] =	1,34536
$\lambda_{T,r,II} =$	0,07854

Sohle

kS_{so} [m] =	0,170
(aus rückrechnung bei m3/s mit D.W.)	
U_{so} [m] =	10,96252

Gesamter Schlauch

F_{ges} [m ²] =	14,9555
$U_{ges} = U_{so} + h_{T,l} + h_{T,r}$	12,00252
$R_{hy,ges}$ [m] =	1,24603

Berechnung der Rhy_i und Überlagerung nach Indlekofer 2003 - Anhand Stickler-Beiwert :

$k_{St,so} =$	$26/(k_{so})^{1/6}$	=	34,93267642
$k_{St,T,i} =$	$26/(k_{T,i})^{1/6}$	=	27,16489753
$k_{St,T,re} =$	$26/(k_{T,re})^{1/6}$	=	24,74573756
$k_{St,ges} =$	$(U_{ges}/\text{Summe}(U_i/k_{St,i}^{(3/2)}))^{(2/3)}$	=	33,84377339

Rhy_{T,i} =	$(k_{St,ges}/k_{St,T,i})^{(3/2)} \cdot Rhy_{ges}$	=	1,732743922	1,936
Rhy_{T,re} =	$(k_{St,ges}/k_{St,T,re})^{(3/2)} \cdot Rhy_{ges}$	=	1,992947632	2,427
Rhy_{so} =	$(k_{St,ges}/k_{St,so})^{(3/2)} \cdot Rhy_{ges}$	=	1,188225038	1,159

$k_{T,i}/Rhy_{T,i} =$	0,44367	>0.12
$k_{T,re}/Rhy_{T,re} =$	0,67506	>0.12
$k_{so}/Rhy_{so} =$	0,14307	>0.12

korrektur mit kappa (κ) notw.

Korrekturfaktoren :

$\kappa_i =$	$(1.467/\log(14.84/(k_{T,i}/Rhy_{T,i})))^6 / (k_{T,i}/Rhy_{T,i})$	=	1,790481029
$\kappa_{re} =$	$(1.467/\log(14.84/(k_{T,re}/Rhy_{T,re})))^6 / (k_{T,re}/Rhy_{T,re})$	=	2,52664919
$\kappa_{so} =$	$(1.467/\log(14.84/(k_{so}/Rhy_{so})))^6 / (k_{so}/Rhy_{so})$	=	1,038096313

Korrigierte Trennflächen-stickler-Beiwerten :

$k_{St,T,i,k} =$	$26/(\kappa_i \cdot k_{T,i})^{1/6}$	=	24,65167597
$k_{St,T,re,k} =$	$26/(\kappa_{re} \cdot k_{T,re})^{1/6}$	=	21,2035988
$k_{St,so,k} =$	$26/(\kappa_{so} \cdot k_{so})^{1/6}$	=	34,71567279

Korrigierte kSt_{ges} :

kSt_{ges,k} =		=	33,07
$vm =$	$k_{St,ges,k} \cdot Rhy_{ges}^{(2/3)} \cdot J^{(1/2)}$	=	0,727
Qges =	$F_{ges} \cdot vm$	=	10,87

Kontrolle teilflächen

$FT_{,i} =$	1,0649	
$FT_{,re} =$	1,1893	
$F_{so} =$	12,7012	
$F_{ges,ber} =$	14,9555	OK

Berechnung der Rhy und Überlagerung nach Indlekofer 2005

RhyT,li=	$kT,li^{1/4} \cdot F_{ges} / (kT,li^{1/4} \cdot hT,li + kT,re^{1/4} \cdot hT,re + k_{so}^{1/4} \cdot U_{so})$	=	1,732743922
RhyT,re=	$kT,re^{1/4} \cdot F_{ges} / (kT,li^{1/4} \cdot hT,li + kT,re^{1/4} \cdot hT,re + k_{so}^{1/4} \cdot U_{so})$	=	1,992947632
Rhyso=	$k_{so}^{1/4} \cdot F_{ges} / (kT,li^{1/4} \cdot hT,li + kT,re^{1/4} \cdot hT,re + k_{so}^{1/4} \cdot U_{so})$	=	1,188225038
$kT,li/RhyT,li=$		=	0,443667153
$kT,re/RhyT,re=$		=	0,675059082
$k_{so}/Rhyso=$		=	0,143070542
$\kappa_{li}=$	$(1.467/\log(14.84/(kT,li/RhyT,li)))^6/(kT,li/RhyT,li)$	=	1,790481029
$\kappa_{re}=$	$(1.467/\log(14.84/(kT,re/RhyT,re)))^6/(kT,re/RhyT,re)$	=	2,52664919
$\kappa_{so}=$	$(1.467/\log(14.84/(k_{so}/Rhyso)))^6/(k_{so}/Rhyso)$	=	1,038096313

RhyT,li,n=	1,93622
RhyT,re,n=	2,42722
Rhyso,n=	1,15861

$\lambda_{li}=$	$1/(2 \cdot \log(14.84/(kT,li/RhyT,li)))^2$	0,101089347
$\lambda_{re}=$		0,122648589
$\lambda_{so}=$		0,062193597

Fli=	1,06492		
Fre=	1,18934		
Fso=	12,70124	Fges =	14,95550

Summe(F_i/λ_i)= 224,4526101

λ _{ges1} =	Summe(λ _i ·U _i)/U _{ges}	0,06644	kSt,ges1=	33,13
λ _{ges2} =	F _{ges} /somme(F _i /λ _i)	0,06663	kSt,ges2=	33,08 (kontrollberechnung)
				=> ok

vm=	0,728
Q _{ges} =	10,89

Profil Q1- F05 - BERECHNUNG NACH MERTENS MIT ERWEITERUNG NACH SPECHT + ÜBERLAGERUNG NACH E.-H.

INITIALER PARAMETERZUSTAND

Gefälle $J[\text{‰}]/\text{m}$	0,36000	0,00036 = J
Wsp =	9,76000	

	y	z	abs(Δy)	abs(Δz)	WSp-z (Wassertiefe) in m	ΔF	ΔU	$\Delta b_{\text{max},i}$	$F_{\text{H},i}$	$0,70375 = \Sigma(F_{\text{H},i})$
0	0,00	10,00				0,000		4,46000		
1	1,00	9,87	1,00	0,130	0,000	0,00000	1,00841	3,46000	0,00000	
2	2,77	9,65	1,77	0,220	0,110	0,09735	1,78362	1,69000	0,09735	
3	3,23	9,44	0,46	0,210	0,320	0,09890	0,50567	1,23000	0,09890	
4	3,73	9,38	0,50	0,080	0,400	0,18000	0,50636	0,73000	0,18000	
5	4,23	9,31	0,50	0,050	0,450	0,21250	0,50249	0,23000	0,21250	
6	4,46	9,21	0,23	0,100	0,455	0,11500	0,25080	0,00000	0,11500	
7	4,73	9,09	0,27	0,120	0,57	0,16470	0,29547			
8	5,23	8,81	0,50	0,280	0,950	0,40500	0,57306			
9	5,73	8,46	0,50	0,350	1,300	0,56250	0,61033			
10	6,73	7,97	1,00	0,490	1,790	1,54500	1,11360			
11	8,73	7,65	2,00	0,320	2,110	3,90000	2,02544			
12	10,73	7,97	2,00	0,320	1,790	3,90000	2,02544			
13			1,04	0,290		1,71080	1,07968			
14	11,77	8,26			1,500					
15	12,77	8,54	1,00	0,280	1,220	1,36000	1,03846			
16	13,77	9,20	1,00	0,660		0,89000	1,19817			
17	14,27	9,25	0,50	0,050	0,510	0,26750	0,50249			
18	14,77	9,27	0,50	0,020	0,490	0,25000	0,50540			
19	15,07	9,32	0,30	0,048	0,442	0,13980	0,30362	0,00000	0,13980	
20	15,27	9,35	0,20	0,032	0,410	0,08520	0,20254	0,30000	0,08520	
21	15,77	9,50	0,50	0,150	0,260	0,16750	0,52202	0,50000	0,16750	
22	16,47	9,74	0,70	0,240	0,020	0,09800	0,74000	1,00000	0,09800	
23	17,27	10,00	0,80	0,260	0,000	0,00800	0,84119	1,70000	0,00800	
								2,50000		

- Eingangsparameter einzufügen
- Trennfächen-stelle (Eingangsparameter auch)
- Werte selbst (bzw mit Makros) zu iterieren
- Ergebnis der Iteration
- Genauigkeitsprüfung bei der Iteration
- Gültigkeitsprüfung der Methode
- Wischenparameter
- Ergebnisse

relative gesamte Breite : b_{ges}/m	4,88626									
b_{ges}	10,31000									
Schätzung	(1) $b_{\text{H},i}$	4,28912	Iteration : (2) $b_{\text{H},i}$	4,28923	$\Delta b_{\text{H},i}$	0,00011	Genauigkeitsprüfung			

Bewuchparameter Böschung links:

$a_{y,i}$	0,245	$a_{y,i}/d_{p,i}$	10,00000	$a_{y,i}/d_{p,i} - 1$	17,84615
$a_{y,i}$	0,245	$10 \cdot d_{p,i}$	0,13000	$B_{i,i} = (a_{y,i}/d_{p,i} - 1)^2 \cdot (a_{y,i}/d_{p,i})$	3 184,85207
$d_{p,i}$	0,013	für $a_{y,i} > 10 \cdot d_{p,i}$, $a_{y,i}/d_{p,i} = 10$		$B_{i,i}/1000$	3,18485
				$c_{H,i} = f(B_{i,i}/100)$	0,58557

Trennfäche links

$r_{T,i}$	0,550	$b_{T,i}$	4,46000	$b_{\text{H},\text{max},i} = b_{\text{H},i}$	4,28912
$-h_{T,i}$		$F_{T,i} = f(b_{T,i})$			
		$b_{\text{H},\text{max},i} = \Sigma(F_{T,i})$			0,70375
				$b_{\text{H},\text{H},i} = F_{T,i}/h_{T,i}$	1,27953

relative TF-Breite: $b_{\text{H},i}/h_{T,i}$	7,798392146	$a_{T,i}$	44,53496
Relative TF-Höhe: $h_{T,i}/h$	0,260663507	$b_{T,i}$	-0,96194
$\Delta T_{T,i} \cdot h_{T,i}$	0,101322548	$fe_{B,i}$	0,31530548353
		$ft_{T,i}$	0,9368213479

Anwendungsbedingungen:

5,2-4($h_{T,i}/h$)	4,157345972	ok
13,2-6,2($h_{T,i}/h$)	11,58389526	ok
$b_{T,i}/h_{T,i}$	7,798392146	ok

(2) $\Delta T_{T,i}$	0,184223
$\Delta \Delta T$	0,000002

Sohle	
$k_{S,0}$ [m]	0,080
(aus rückrechnung bei m3/s mit D.W.)	
$U_{S,0}$ [m]	10,96252

(annahme $R_{Hy,T,i} = b_{\text{H},i}$)

Gesamter Schlauch

F_{ges} [m ²]	14,9555
$U_{\text{ges}} = U_{S,0} + r_{T,i} + h_{T,i}$	12,00252
$R_{Hy,ges}$ [m]	1,24603
$r = \text{Wassertiefe, max}$	2,11000

Bewuchparameter Böschung rechts:

$a_{y,re}$	0,840	$a_{y,re}/d_{p,re}$	8,75000	$a_{y,re}/d_{p,re} - 1$	7,75000
$a_{y,re}$	0,840	$10 \cdot d_{p,re}$	0,96000	$B_{re} =$	525,54688
$d_{p,re}$	0,096			$B_{re}/1000$	0,52555
				$c_{H,re}$	1,06520

Trennfäche rechts

$r_{T,re}$	0,490	$b_{T,re}$	2,50000	$b_{\text{H},\text{max},re} = b_{\text{H},re}$	6,02088
$-h_{T,gr}$		$F_{T,re} = f(b_{T,re})$			
		$b_{\text{H},\text{max},re} = \Sigma(F_{T,re,i})$			6,02088
				$b_{\text{H},\text{H},re} = F_{T,re}/h_{T,re}$	1,01735

relative TF-Breite: $b_{\text{H},re}/h_{T,re}$	12,28751902	$a_{T,re}$	55,41595
Relative TF-Höhe: $h_{T,re}/h$	0,232227488	$b_{T,re}$	-0,92329
$\Delta T_{T,re} \cdot h_{T,re}$	0,126712362	$fe_{B,re}$	0,12847
		$ft_{T,re}$	1,02574

Anwendungsbedingungen:

5,2-4($h_{T,re}/h$)	4,271090047	ok
13,2-6,2($h_{T,re}/h$)	11,76019957	ok
relativer TF-Abstand: $b_{T,re}/h_{T,re}$	12,28751902	Probleme stabilite

(2) $\Delta T_{T,re}$	0,2585967
$\Delta \Delta T$	0,000001

(annahme $R_{Hy,T,re} = b_{\text{H},re}$)

$k_{T,re}$ [m]	6,22082
$\Delta T_{T,re}$	0,2585959

Anhang 12

Rückrechnung von ks_{so} anhand von verschiedenen Annahmenkombinationen (s. Abschnitt 4.4.2.1.2)

- Annahmenkombination (2) : Seite 138 bis 141
- Annahmenkombination (3) : Seite 142 bis 145
- Annahmenkombination (4) : Seite 146 bis 149

Rückrechnung von $ks_{so}^{(2)}$ mit der Annahmenkombination (2) (s. Abstaz 4.4.2.1.2.3 Seite 75)

Messtermin : Herbst 2004

eingestellter, nominaler Durchfluss : $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(2)}(\text{H4-6})$
$Q_{\text{gem}}(\text{H4-6})$ [m ³ /s]	5,98	+/- 5 %	[5,68 – 6,28]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-4)} \right _{Q_{\text{gem}}} = 18\%$
$J_M(\text{H4-6})$ [‰]	0,400	+/- 2 %	[0,393 – 0,407]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-4)} \right _{J_M} = 3\%$
$W_{\text{sp}}(\text{H4-6})$ [m]	9,36	+/- 1 cm	[9,35 – 9,37]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-4)} \right _{W_{\text{sp}}} = 5\%$
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(2)}(\text{H4-6})$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(2)}(\text{H4-6})$ im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt :

$$F_{\text{ges,init}}^{(2)}(\text{H4-6}) = 10,71 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{hy,ges,init}}^{(2)}(\text{H4-6}) = 1,043 \text{ m}$$

und mit der Gleichung [36] :

$ks_{so,init}^{(2)}(\text{H4-6}) = 0,444 \text{ m}$

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(2)}(\text{H4-6})$ hat geliefert:

$0,34 \text{ m} \leq ks_{so}^{(2)}(\text{H4-6}) \leq 0,57 \text{ m}$
--

Rückrechnung von $ks_{so}^{(2)}$ mit der Annahmenkombination (2) (s. Abstaz 4.4.2.1.2.3 Seite 75)

Messtermin : Frühjahr 2005

eingestellter, nominaler Durchfluss : $4 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(2)}(F5-4)$
$Q_{gem}(F5-4)$ [m³/s]	4,10	+/- 5 %	[3,90 – 4,31]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-4)} \right _{Q_{gem}} = 22\%$
$J_M(F5-4)$ [‰]	0,350	+/- 2 %	[0,343 – 0,353]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-4)} \right _{J_M} = 5\%$
$W_{sp}(F5-4)$ [m]	8,98	+/- 1 cm	[8,97 – 8,99]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-4)} \right _{W_{sp}} = 7\%$
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(2)}(F5-4)$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(2)}(F5-4)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt:

$$F_{\text{ges,init}}^{(2)}(\text{F5-4}) = 7,27 \text{ m}^2$$

$$R_{hy_{ges,init}}^{(2)}(F5-4) = 0,804 \text{ m}$$

und mit der Gleichung [36] :

$$\mathbf{k}_{\text{so,init}}^{(2)}(\text{F5-4}) = 0,15 \text{ m}$$

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{s_0}^{(2)}(F5-4)$ hat geliefert:

$$0,11 \text{ m} \leq k_{S_{s0}}^{(2)}(\text{F5-4}) \leq 0,21 \text{ m}$$

Rückrechnung von $ks_{so}^{(2)}$ mit der Annahmenkombination (2) (s. Abstaz 4.4.2.1.2.3 Seite 75)

Messtermin : Frühjahr 2005

eingestellter, nominaler Durchfluss : $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(2)}(F5-6)$
$Q_{\text{gem}}(F5-6)$ [m ³ /s]	5,90	+/- 5 %	[5,61 – 6,20]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-6)} \right _{Q_{\text{gem}}} = 21\%$
$J_M(F5-6)$ [%o]	0,370	+/- 2 %	[0,363 – 0,477]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-6)} \right _{J_M} = 4\%$
$W_{sp}(F5-6)$ [m]	9,26	+/- 1 cm	[9,25 – 9,27]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-6)} \right _{W_{sp}} = 6\%$
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(2)}(F5-6)$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(2)}(F5-6)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt:

$$F_{\text{ges,init}}^{(2)}(F5-6) = 9,78 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{hy,ges,init}}^{(2)}(F5-6) = 0,972 \text{ m}$$

und mit der Gleichung [36] :

$ks_{so,init}^{(2)}(F5-6) = 0,23 \text{ m}$

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(2)}(F5-6)$ hat geliefert:

$0,17 \text{ m} \leq ks_{so}^{(2)}(F5-6) \leq 0,31 \text{ m}$

Rückrechnung von $ks_{so}^{(2)}$ mit der Annahmenkombination (2) (s. Abstaz 4.4.2.1.2.3 Seite 75)

Messtermin : Herbst 2005

eingestellter, nominaler Durchfluss : $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(2)}(\text{H5-6})$
$Q_{\text{gem}}(\text{H5-6})$ [m ³ /s]	6,03	+/- 5 %	[5,73 – 6,33]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-6)} \right _{Q_{\text{gem}}} = 21\%$
$J_M(\text{H5-6})$ [%o]	0,360	+/- 2 %	[0,353 – 0,367]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-6)} \right _{J_M} = 4\%$
$W_{\text{sp}}(\text{H5-6})$ [m]	9,27	+/- 1 cm	[9,26 – 9,28]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(2)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(2)}(F5-6)} \right _{W_{\text{sp}}} = 6\%$
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(2)}(\text{H5-6})$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(2)}(\text{H5-6})$ im Herbst 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt:

$$F_{\text{ges,init}}^{(2)}(\text{H5-6}) = 9,88 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{hy,ges,init}}^{(2)}(\text{H5-6}) = 0,979 \text{ m}$$

und mit der Gleichung [36] :

$ks_{so,init}^{(2)}(\text{H5-6}) = 0,21 \text{ m}$
--

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(2)}(\text{H5-6})$ hat geliefert:

$0,15 \text{ m} \leq ks_{so}^{(2)}(\text{H5-6}) \leq 0,29 \text{ m}$
--

Rückrechnung von $ks_{so}^{(3)}$ mit der Annahmenkombination (3) (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.4 Seite 81)

Messtermin : Herbst 2004

eingestellter, nominaler Durchfluss : $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(3)}(\text{H4-6})$
$Q_{\text{gem}}(\text{H4-6})$ [m ³ /s]	5,98	+/- 5 %	[5,68 – 6,28]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(\text{H4-6})}{ks_{so,init}^{(3)}(\text{H4-6})} \right _{Q_{\text{gem}}} = 18\%$
$J_M(\text{H4-6})$ [‰]	0,400	+/- 2 %	[0,393 – 0,407]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(\text{H4-6})}{ks_{so,init}^{(3)}(\text{H4-6m}^3)} \right _{J_M} = 3\%$
$W_{\text{sp}}(\text{H4-6})$ [m]	9,36	+/- 1 cm	[9,35 – 9,37]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(\text{H4-6})}{ks_{so,init}^{(3)}(\text{H4-6})} \right _{W_{\text{sp}}} = 5\%$
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(3)}(\text{H4-6})$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(3)}(\text{H4-6})$ im Herbst 2004 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt:

$$F_{\text{ges,init}}^{(3)}(\text{H4-6}) = 10,71 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{hy,ges,init}}^{(3)}(\text{H4-6}) = 1,043 \text{ m}$$

und mit der Gleichung [36] :

$ks_{so,init}^{(3)}(\text{H4-6}) = 0,33 \text{ m}$
--

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(3)}(\text{Q1-H04-6m}^3/\text{s})$ hat geliefert:

$0,25 \text{ m} \leq ks_{so}^{(3)}(\text{H4-6}) \leq 0,42 \text{ m}$
--

Rückrechnung von $ks_{so}^{(3)}$ mit der Annahmenkombination (3) (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.4 Seite 81)

Messtermin : Frühjahr 2005

eingestellter, nominaler Durchfluss : $4 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(3)}(F5-4)$
$Q_{gem}(F5-4)$ [m ³ /s]	4,10	+/- 5 %	[3,90 – 4,31]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(3)}(F5-4)} \right _{Q_{gem}} = 22\%$
$J_M(F5-4)$ [‰]	0,350	+/- 2 %	[0,343 – 0,353]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(3)}(F5-4)} \right _{J_M} = 5\%$
$W_{sp}(F5-4)$ [m]	8,98	+/- 1 cm	[8,97 – 8,99]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(3)}(F5-4)} \right _{W_{sp}} = 7\%$
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(3)}(F5-4)$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(3)}(F5-4)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt:

$$F_{ges,init}^{(3)}(F5-4) = 7,27 \text{ m}^2$$

$$Rhy_{ges,init}^{(3)}(F5-4) = 0,804 \text{ m}$$

und mit der Gleichung [36] :

$$ks_{so,init}^{(3)}(F5-4) = 0,11 \text{ m}$$

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(3)}(F5-4)$ hat geliefert:

$$0,08 \text{ m} \leq ks_{so}^{(3)}(F5-4) \leq 0,15 \text{ m}$$

Rückrechnung von $ks_{so}^{(3)}$ mit der Annahmenkombination (3) (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.4 Seite 81)

Messtermin : Frühjahr 2005

eingestellter, nominaler Durchfluss : $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(3)}(F5-6)$
$Q_{gem}(F5-6)$ [m ³ /s]	5,90	+/- 5 %	[5,61 – 6,20]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(3)}(F5-6)} \right _{Q_{gem}} = 20\%$
$J_M(F5-6)$ [‰]	0,370	+/- 2 %	[0,363 – 0,477]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(3)}(F5-6)} \right _{J_M} = 4\%$
$Wsp(F5-6)$ [m]	9,26	+/- 1 cm	[9,25 – 9,27]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(3)}(F5-6)} \right _{Wsp} = 6\%$
Profil- geometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(3)}(F5-6)$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(3)}(F5-6)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt:

$$F_{ges,init}^{(3)}(F5-6) = 9,78 \text{ m}^2$$

$$Rhy_{ges,init}^{(3)}(F5-6) = 0,972 \text{ m}$$

Und mit der Gleichung [36] :

$ks_{so,init}^{(3)}(F5-6) = 0,17 \text{ m}$

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(3)}(F5-6)$ hat geliefert:

$0,12 \text{ m} \leq ks_{so}^{(3)}(F5-6) \leq 0,21 \text{ m}$

Rückrechnung von $ks_{so}^{(3)}$ mit der Annahmenkombination (3) (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.4 Seite 81)

Messtermin : Herbst 2005

eingestellter, nominaler Durchfluss : $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(3)}(\text{H5-6})$
$Q_{\text{gem}}(\text{H5-6})$ [m ³ /s]	6,03	+/- 5 %	[5,73 – 6,33]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(3)}(F5-6)} \right _{Q_{\text{gem}}} = 21\%$
$J_M(\text{H5-6})$ [‰]	0,360	+/- 2 %	[0,353 – 0,367]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(3)}(F5-6)} \right _{J_M} = 4\%$
$W_{\text{sp}}(\text{H5-6})$ [m]	9,27	+/- 1 cm	[9,26 – 9,28]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(3)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(3)}(F5-6)} \right _{W_{\text{sp}}} = 6\%$
Profil- geometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(3)}(\text{H5-6})$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(3)}(\text{H5-6})$ im Herbst 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J als mittleres Gefälle der Strecke R1 definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt:

$$F_{\text{ges,init}}^{(3)}(\text{H5-6}) = 9,88 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{hy,ges,init}}^{(3)}(\text{H5-6}) = 0,979 \text{ m}$$

Und mit der Gleichung [36] :

$$ks_{so,init}^{(3)}(\text{H5-6}) = 0,16 \text{ m}$$

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(3)}(\text{H5-6})$ hat geliefert:

$$0,11 \text{ m} \leq ks_{so}^{(3)}(\text{H5-6}) \leq 0,21 \text{ m}$$

Rückrechnung von $ks_{so}^{(4)}$ mit der Annahmenkombination (4) (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.5 Seite 84)

Messtermin : Herbst 2004

eingestellter, nominaler Durchfluss : $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(4)}(H4-6)$
$Q_{gem}(H4-6)$ [m ³ /s]	5,98	+/- 5 %	[5,68 – 6,28]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(H4-6)}{ks_{so,init}^{(4)}(H4-6)} \right _{Q_{gem}} = 20\%$
$J_H(H4-6)$ [%o]	0,314	+/- 8 %	[0,289 – 0,339]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(H4-6)}{ks_{so,init}^{(4)}(H4-6)} \right _{J_M} = 16\%$
$W_{sp}(H4-6)$ [m]	9,36	+/- 1 cm	[9,35 – 9,37]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(H4-6)}{ks_{so,init}^{(4)}(H4-6)} \right _{W_{sp}} = 6\%$
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(4)}(H4-6)$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(4)}(H4-6)$ im Herbst 2004 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J zwischen Q1 und W2 flussabwärts definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt (ändern sich nicht mit den neuen Annahmen):

$$F_{ges,init}^{(4)}(H4-6) = 10,71 \text{ m}^2$$

$$R_{hy,ges,init}^{(4)}(H4-6) = 1,043 \text{ m}$$

und mit der Gleichung [36] :

$ks_{so,init}^{(4)}(H4-6) = 0,21 \text{ m}$

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(4)}(H4-6)$ hat geliefert:

$0,14 \text{ m} \leq ks_{so}^{(4)}(H4-6) \leq 0,31 \text{ m}$

Rückrechnung von $ks_{so}^{(4)}$ mit der Annahmenkombination (4) (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.5 Seite 84)

Messtermin : Frühjahr 2005

eingestellter, nominaler Durchfluss : $4 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(4)}(F5-4)$
$Q_{gem}(F5-4)$ [m ³ /s]	4,10	+/- 5 %	[3,90 – 4,31]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(4)}(F5-4)} \right _{Q_{gem}} = 23\%$
$J_H(F5-4m)$ [‰]	0,301	+/- 9 %	[0,274 – 0,328]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(4)}(F5-4)} \right _{J_M} = 21\%$
$Wsp(F5-4)$ [m]	8,98	+/- 1 cm	[8,97 – 8,99]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(F5-4)}{ks_{so,init}^{(4)}(F5-4)} \right _{Wsp} = 8\%$
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(4)}(F5-4)$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(4)}(F5-4)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J zwischen Q1 und W2 flussabwärts definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt (ändern sich nicht mit den neuen Annahmen) :

$$F_{ges,init}^{(4)}(F5-4) = 7,27 \text{ m}^2$$

$$Rhy_{ges,init}^{(4)}(F5-4) = 0,804 \text{ m}$$

und mit der Gleichung [36] :

[51]	$ks_{so,init}^{(4)}(F5-4) = 0,08 \text{ m}$
------	---

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(4)}(F5-4)$ hat geliefert:

[52]	$0,05 \text{ m} \leq ks_{so}^{(4)}(F5-4) \leq 0,13 \text{ m}$
------	---

Rückrechnung von $ks_{so}^{(4)}$ mit der Annahmenkombination (4) (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.5 Seite 84)

Messtermin : Frühjahr 2005

eingestellter, nominaler Durchfluss : $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(4)}(F5-6)$
$Q_{gem}(F5-6)$ [m ³ /s]	5,90	+/- 5 %	[5,61 – 6,20]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(4)}(F5-6)} \right _{Q_{gem}} = 22\%$
$J_H(F5-6)$ [‰]	0,327	+/- 8 %	[0,298 – 0,356]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(4)}(F5-6)} \right _{J_M} = 19\%$
$Wsp(F5-6)$ [m]	9,26	+/- 1 cm	[9,25 – 9,27]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(4)}(F5-6)} \right _{Wsp} = 7\%$
Profilgeometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(4)}(F5-6)$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(4)}(F5-6)$ im Frühjahr 2005 bei $Q_{nom} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J zwischen Q1 und W2 flussabwärts definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt (ändern sich nicht mit den neuen Annahmen) :

$$F_{ges,init}^{(4)}(F5-6) = 9,78 \text{ m}^2$$

$$Rhy_{ges,init}^{(4)}(F5-6) = 0,972 \text{ m}$$

Und mit der Gleichung [36] :

[53]	$ks_{so,init}^{(4)}(F5-6) = 0,13 \text{ m}$
------	---

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(4)}(F5-6)$ hat geliefert:

[54]	$0,08 \text{ m} \leq ks_{so}^{(4)}(F5-6) \leq 0,19 \text{ m}$
------	---

Rückrechnung von $ks_{so}^{(4)}$ mit der Annahmenkombination (4) (s. Abschnitt 4.4.2.1.2.5 Seite 84)

Messtermin : Herbst 2005

eingestellter, nominaler Durchfluss : $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Parameter	initialer Wert	Unsicherheit	Vertrauensbereich	Resultierende Fehler für $ks_{so}^{(4)}(\text{H5-6})$
$Q_{\text{gem}}(\text{H5-6})$ [m ³ /s]	6,03	+/- 5 %	[5,73 – 6,33]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(4)}(F5-6)} \right _{Q_{\text{gem}}} = 22\%$
$J_M(\text{H5-6})$ [‰]	0,314	+/- 8 %	[0,289 – 0,339]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(4)}(F5-6)} \right _{J_M} = 18\%$
$W_{\text{sp}}(\text{H5-6})$ [m]	9,27	+/- 1 cm	[9,26 – 9,28]	$\left \frac{\Delta ks_{so}^{(4)}(F5-6)}{ks_{so,init}^{(4)}(F5-6)} \right _{W_{\text{sp}}} = 7\%$
Profil- geometrie	laut Bild 22 und Variante A laut Bild 34	-	-	-

Eingangsparameter von $ks_{so}^{(4)}(\text{H5-6})$ und ihre resultierenden Fehler für $ks_{so}^{(4)}(\text{H5-6})$ im Herbst 2005 bei $Q_{\text{nom}} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ mit J zwischen Q1 und W2 flussabwärts definiert und die rechte Trennfläche laut Variante A definiert

Mit den initialen Werten der Parameter wird ermittelt (ändern sich nicht mit den neuen Annahmen):

$$F_{\text{ges,init}}^{(4)}(\text{H5-6}) = 9,88 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{hy,ges,init}}^{(4)}(\text{H5-6}) = 0,979 \text{ m}$$

Und mit der Gleichung [36] :

$ks_{so,init}^{(4)}(\text{H5-6}) = 0,12 \text{ m}$
--

Die Untersuchung der Fehlerschranke von $ks_{so}^{(4)}(\text{H5-6})$ hat geliefert:

$0,08 \text{ m} \leq ks_{so}^{(4)}(\text{H5-6}) \leq 0,18 \text{ m}$
--