

Technische Universität Graz

Dekanat für Bauingenieurwissenschaften

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft



**Entwicklung einer Software zur Berechnung von
hydraulischen und sedimentologischen Kennwerten
in gegliederten Flussquerprofilen**

Masterarbeit

von

Reinhard FLEIßNER

Vorgelegt zur Erlangung des

akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

der Studienrichtung Bauingenieurwesen

Graz, im November 2013

Betreuer der Diplomarbeit:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald ZENZ

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Clemens DORFMANN

Eid (Ehrenwörtliche Erklärung)

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, im November 2013

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Clemens Dorfmann für die hochinteressante und spannende Aufgabenstellung und seine stets unkomplizierte und ausgezeichnete Betreuung bedanken.

Ein weiterer Dank geht an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz, der mir mit seinem fachlichen Wissen stets zur Seite stand, sowie an das gesamte Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft für die freundliche Unterstützung und Hilfsbereitschaft.

Zu Dank verpflichtet bin ich auch all meinen Kollegen und Freunden, die mich während meiner Studienzeit begleitet haben und vor allem meiner Freundin für das Verständnis und meiner Familie für das Vertrauen, das sie mir stets entgegenbrachten und dass sie mir mein Studium ermöglicht haben.

Kurzfassung

Die Berechnung von hydrodynamischen und vor allem sedimentologischen Kennwerten in einem fließenden Gewässer ist ein wichtiger Bestandteil des Flusswasserbaus. Ziel dieser Arbeit ist, ein einfaches und intuitiv zu bedienendes Programm zu entwickeln, welches Strömungskennwerte und gleichzeitig den Sedimenttransport auf Basis eines gegliederten Flussquerprofils berechnen kann. Es wird in die zwei Hauptmodule Praxis und Lehre gegliedert. Im Modul Praxis stehen mehrere Ansätze für die Berechnung der Sedimenttransportkapazität zur Verfügung. Weiters werden wichtige Kennwerte wie Partikelfallgeschwindigkeit, Rouse-Zahl, Shields-Parameter und Kornverteilungsparameter berechnet und ausgegeben. Mit der Berechnung dieser Kennwerte kann das Programm als Schnittstelle für komplexe numerische Strömungs- und Sedimenttransportberechnungen dienen, indem einerseits numerische Berechnungsergebnisse auf Plausibilität überprüft und andererseits Eingaberandbedingungen generiert werden können. Das Modul Lehre soll in Zukunft eine Art Informationsplattform darstellen, in der Themen des gesamten Wasserbaus aufgegriffen und in Form von Texten, Abbildungen und Rechenmodulen zur Verfügung gestellt werden. Das Programm, aber vor allem das Modul Lehre, ist als laufendes Lehrprojekt zu verstehen, indem es in Form von studentischen Projektarbeiten weiterentwickelt werden soll. Das Projekt ist Bestandteil des Kooperationsprojekts Sustainicum und wird vom österreichischen Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung gefördert.

In erster Linie ist das Programm an Studenten und Lehrende im Bereich des Wasserbaus sowie an Wasserbauingenieure in der Praxis gerichtet. Mit dem Gedanken an Wissenstransfer werden die Software und der Quellcode frei zur Verfügung gestellt.

Abstract

The calculation of hydrodynamic and sedimentological parameters is an important component of river engineering. The aim of this work is to develop a simple and intuitive tool that calculates characteristic flow values and also the sediment transport based on an irregularly shaped cross section. It is organized into two main modules, engineering and education. In the module engineering there are several approaches to calculate the sediment transport capacity. Further important characteristic values like particle fall velocity, Rouse-number, Shields-parameter and parameters of the grain size distribution are calculated. With these parameters, the program can serve as an interface for complex numerical flow and sediment transport calculations, where on the one hand results from numerical calculation can be checked for plausibility and on the other hand boundary conditions can be generated. In future the module education will be a kind of information platform, in which themes of the entire water engineering are provided in the form of texts, images and computational modules. The program, especially the module education is to be understood as an ongoing teaching project, which should be further developed in the form of student project work. The project is part of the cooperation project Sustainicum and is funded by the Austrian Federal Ministry of Science and Research.

First and foremost, the program is aimed at students and teachers in the field of water engineering and hydraulic engineers in practice. With the idea of knowledge transfer the software and the source code should be made freely available.

Inhaltsverzeichnis

Teil A: Allgemeines

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung.....	2
1.2	Zielsetzung.....	2
2	Veröffentlichungen	4
3	Das Kooperationsprojekt SUSTAINICUM	5
	Literaturverzeichnis	6
	Abbildungsverzeichnis	7

Teil B: Referenzhandbuch

Verzeichnis der Abkürzungen	iii
Formelzeichen.....	iii
Indizes	iv
1 Einleitung	1
2 Hydraulische Grundlagen	2
2.1 Geometrie eines Flussquerprofils.....	3
2.2 Fließformeln.....	3
2.3 Umrechnung der Rauigkeiten.....	7
2.4 Hydraulische Berechnung.....	10
2.5 Berechnung der kritischen Abflusshöhe.....	12
2.6 Berechnung der mittleren Energiehöhe.....	12
2.7 Weitere hydraulische Kennwerte	13
2.8 Aufbereitung der hydraulischen Ergebnisse.....	15
3 Sedimentologische Grundlagen.....	16
3.1 Korngrößenverteilung.....	16
3.2 Hiding-Exposure-Korrektur	18
3.3 Allgemeine sedimentologische Kennwerte	21
3.4 Sedimenttransport nach Meyer-Peter und Müller.....	25
3.5 Sedimenttransport nach Van Rijn.....	26
3.6 Sedimenttransport nach Wu et al	26
3.7 Sedimenttransport nach Engelund-Hansen.....	27
3.8 Sedimenttransport nach Yang	27
3.9 Umrechnung zwischen Einheiten der Transportkapazität	30
Literaturverzeichnis	31
Abbildungsverzeichnis	33
Tabellenverzeichnis	34

Teil C: Benutzerhandbuch

1	Einleitung	1
2	Der Einstieg in das Programm	2
2.1	Download und Installation.....	2
2.2	Source-Code.....	2
2.3	Überblick auf die Programmfähigkeiten.....	3
2.4	Navigation im Modul PRAXIS.....	5
2.5	Speichern, Öffnen und Schließen von Projekten.....	6
3	Schritte einer Berechnung	7
3.1	Ein neues Projekt anlegen	7
3.2	Eingabe der Projektbeschreibung.....	8
3.3	Wahl der Sedimenttransportformeln.....	8
3.4	Eingabe der Geometrie.....	9
3.5	Eingabe der hydraulischen Eingangsgrößen.....	11
3.6	Eingabe der sedimentologischen Eingangsgrößen.....	12
3.7	Starten des Berechnungsvorganges	14
4	Ergebnisse	15
4.1	Tabellen	16
4.2	Grafiken	18
	Abbildungsverzeichnis	22

Teil D: Programmierung

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Berechnung.....	2
3	Entwicklung des Programms.....	3
3.1	Verwendete Software und Bibliotheken	3
3.2	Die Projektdateien	6
3.3	Klassen und Makros	7
3.4	Generieren der Benutzeroberfläche zu Python-Dateien.....	9
3.5	Generieren einer ausführbaren Datei mit PyInstaller	12
4	Lizenz.....	14
4.1	Lizenzbedingungen	14
	Literaturverzeichnis	15
	Abbildungsverzeichnis	16
	Tabellenverzeichnis	17

Teil A

Allgemeines

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Zielsetzung	2
2	Veröffentlichungen	4
3	Das Kooperationsprojekt SUSTAINICUM	5
	Literaturverzeichnis	6
	Abbildungsverzeichnis	7

1 Einleitung

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie hat mittlerweile in allen EU-Ländern Einzug gehalten. Diese sieht vor allem die Umsetzung von Maßnahmen vor, den ökologischen Zustand von Gewässern zu beurteilen und zu verbessern. Die Kenntnis von hydrodynamischen Kennwerten eines fließenden Gewässers (Abbildung 1) ist essentiell für die Beurteilung eines Gewässers bzw. die Bemessung von wasserbaulichen Anlagen (Hochwasserschutzbauwerke, Renaturierungsmaßnahmen, Wasserkraftwerke, Strauraummanagement, etc.). Von weiterer großer Bedeutung ist der Sedimenthaushalt eines Flusses verbunden mit der Frage: Ist der Fluss im Gleichgewicht?

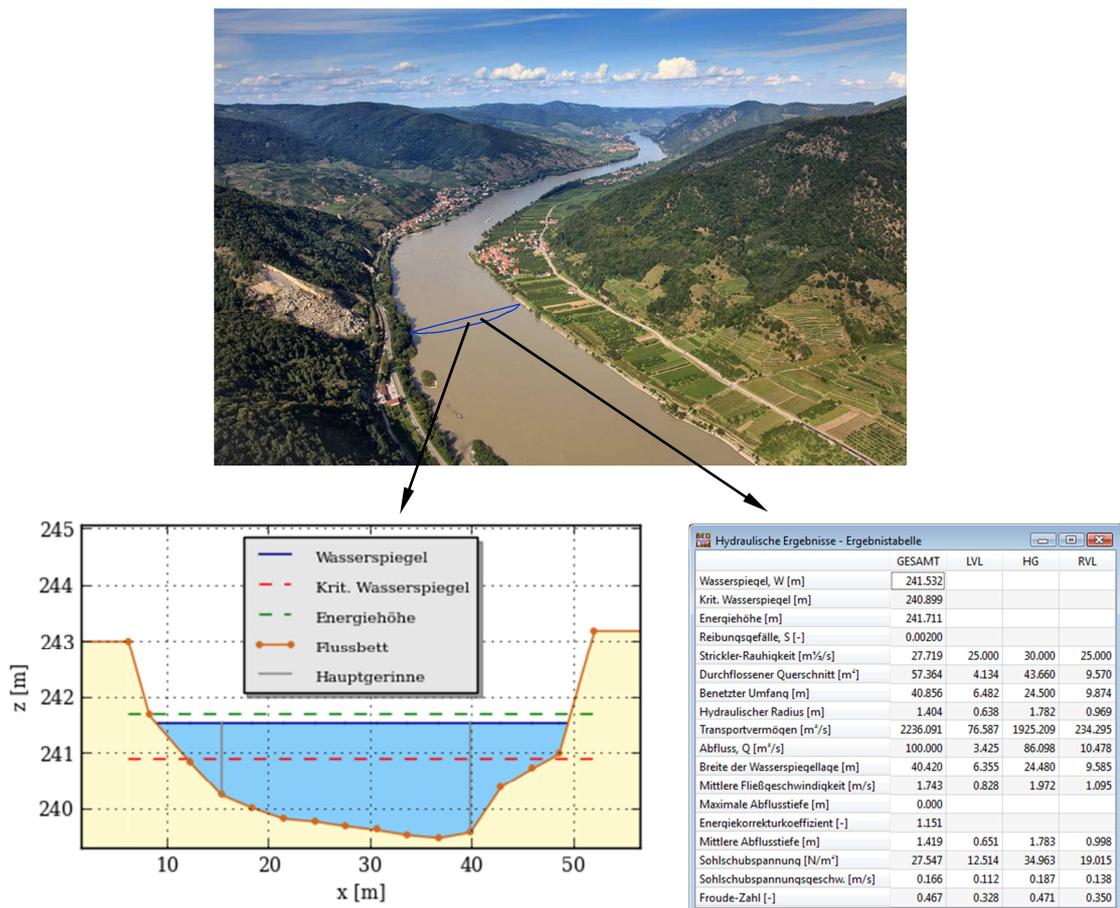


Abbildung 1: Kenntnis von hydraulischen Kennwerten eines fließenden Gewässers¹

¹ Quelle oberes Bild: Donau Niederösterreich Tourismus GmbH, URL: http://www.donau.com/de/donau-niederosterreich/infos-service/presse-b2b/b2b-partnerweb/zielmarke/275aaa55eee22b9f313417a6295ba9ea/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail (Stand: 25.10.2013)

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel ist die Entwicklung eines einfachen und intuitiv zu bedienenden Programmes, welches Strömungskennwerte und gleichzeitig den Sedimenttransport auf Basis eines gegliederten Flussquerprofils berechnen kann. Die erste Version des Programms wurde im Zuge eines Bachelor- (Moser, 2012) und eines Masterprojekts (Fleißner, 2012) entwickelt und bildet die Grundlage dieser Arbeit. Die Aufgabenstellung in vorliegender Masterarbeit beinhaltet die Überarbeitung und Neukonzipierung der bereits vorhandenen Version. Das Programm mit dem Namen Bed Load Analyzer ist in die zwei Hauptmodule Praxis und Lehre zu gliedern. Im Modul Praxis soll die hydraulische und sedimentologische Berechnung für mehrere hydraulische Lastfälle durchgeführt werden können. Für die Berechnung der Sedimenttransportkapazität sollen mehrere Ansätze zur Verfügung stehen. Es soll die Berechnung für eine einzelne Korngröße oder für eine Korngrößenverteilung durchgeführt werden können. Die Hiding-Exposure-Korrektur sowie die Korrektur der Kornschubspannung sollen implementiert werden. Neben den hydraulischen Kennwerten und der Transportkapazität sollen wichtige sedimentologische Kennwerte wie Partikelsinkgeschwindigkeit, Rouse-Zahl, Shields-Parameter und Kornverteilungsparameter berechnet und ausgegeben werden. Die geforderte intuitive Bedienung des Programmes sieht eine grafische Benutzeroberfläche vor, in der Berechnungen einfach angelegt und bearbeitet werden können. Schlussendlich sind die im Programm implementierten Berechnungen in einem Handbuch zu dokumentieren. Für die Anwendung des Programmes ist ein Benutzerhandbuch zu verfassen.

1.2 Zielsetzung

Das Programm soll als Schnittstelle für komplexe numerische Strömungs- und Sedimenttransportberechnungen dienen, indem einerseits numerische Berechnungsergebnisse auf Plausibilität überprüft und andererseits Eingaberandbedingungen generiert werden können. Das Modul Lehre soll in Zukunft eine Art Informationsplattform darstellen, in der Themen des gesamten Wasserbaus aufgegriffen und in Form von Texten, Abbildungen und Rechenmodulen zur Verfügung gestellt werden. Das Pro-

gramm, aber vor allem das Modul Lehre, ist als laufendes Lehrprojekt zu verstehen, indem es in Form von studentischen Projektarbeiten weiterentwickelt werden soll.

In erster Linie soll sich das Programm an Studenten und Lehrende im Bereich Wasserbau und Wasserwirtschaft sowie an Wasserbauingenieure in der Praxis richten. Durch den modularen Aufbau und die intuitive Bedienführung sollen auch Studenten und Lehrende wasserbauverwandter Fachrichtungen wie Ökologie, Kulturtechnik, Geographie, Hydrobiologie, etc. mit der Software Konzepte des Flussbaus kennenlernen und anwenden können, ohne mit der komplexen Thematik der Hydrodynamik umfassend vertraut sein zu müssen. Mit dem Gedanken an Wissenstransfer soll die Software und der Quellcode frei zur Verfügung gestellt werden.

2 Veröffentlichungen

Aus einem Bachelor- (Moser, 2012) und einem Masterprojekt (Fleißner, 2012) entspringt die erste Version des Bed Load Analyzers, welche im Zuge des Wasserbausymposiums 2012 in Graz publiziert wurde (Fleißner et al., 2012). Die zweite und aktuelle Version, welche in dieser Arbeit vorgestellt wird, wurde im Rahmen des JUWI-Treffens 2013 in Graz publiziert und präsentiert (Fleißner et al., 2013).

3 Das Kooperationsprojekt SUSTAINICUM

Das Projekt Bed Load Analyzer ist ein Baustein des Kooperationsprojekts SUSTAINICUM² (Kromp-Kolb et al., 2012), das vom österreichischen Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung³ (bmwf, 2013) im Rahmen der Budgetoffensive 2011/12 für den Hochschulbereich gefördert wird.

SUSTAINICUM ist ein Kooperationsprojekt der Universität für Bodenkultur Wien, der Karl-Franzens-Universität Graz und der Technischen Universität Graz. Es zielt darauf ab, Themen der Nachhaltigkeit aus der Sicht verschiedener Fachgebiete in die universitäre Lehre einzubringen.

Unterschiedlichste Themen mit Nachhaltigkeitsbezug sollen mit Hilfe innovativer Lehrformen für Studierende aller Studienrichtungen erlebbar gemacht werden, um so ein systemisches und ganzheitliches Denken zu fördern. Die Hauptaufgabe besteht darin, einen offenen Pool an Inhalten und Materialien zur Erlebarmachung der wesentlichen Begriffe, Systeme, Grundkonzepte und Prozesse von nachhaltiger Entwicklung (z. B. die Themenbereiche Klima, Energie, Ressourcen und Resilienz sowie auch Aspekte wie Bildung und Lebenslanges Lernen, nachhaltige Stadt- und Regionalentwicklung) aufzubauen. Diese Konzepte mit Nachhaltigkeitsbezug sollen in Form von kleinen Experimenten, Real- oder Computerspielen, Simulationen o. ä. im Unterricht eingesetzt werden können. Im Rahmen des SUSTAINICUM-Projekts sollen vorhandene Lehrveranstaltungs-Bausteine mit Nachhaltigkeitsbezug gesammelt und neue Bausteine geschaffen werden, und zukünftig allen Lehrenden zur Verfügung gestellt werden. Zentrale Sammelstelle ist die Internet-Plattform SUSTAINICUM, welche glossarartig, von Textbausteinen mit Querbezügen begleitet, aufgebaut ist und stetig anwächst.



² <http://www.sustainicum.at>

³ <http://www.bmwf.gv.at>

Literaturverzeichnis

bmwf. (2013). Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung. Abgerufen am 31. 07. 2013 von <http://www.bmwf.gv.at>

Fleißner, R. (2012). *Masterprojekt Wasserbau*. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz.

Fleißner, R., Dorfmann, C. & Zenz, G. (2012). Software zur eindimensionalen Berechnung von Wasserspiegel und Sedimenttransport in gegliederten Querschnitten. *Wasserbau Symposium 2012 Wasser - Energie Global denken - lokal handeln* (S. 29-36). Graz: Verlag der Technischen Universität Graz.

Fleißner, R., Dorfmann, C. & Zenz, G. (2013). Bed Load Analyzer - Software zur Berechnung von hydraulischen und sedimentologischen Kennwerten in gegliederten Querschnitten. *15. JUWI-Treffen. Fachbeiträge zur Tagung vom 31. Juli - 02. August 2013*. (S.193-200). Graz: Verlag der Technischen Universität Graz.

Kromp-Kolb, H., Kromp, R. & Embacher, F. (2012). Sustainicum Collection, Lehrmaterialien für Bildung zur Nachhaltigkeit. Abgerufen am 31. 07. 2013 von <http://www.sustainicum.at>

Moser, K. (2012). Bachelorprojekt Wasserbau. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kenntnis von hydraulischen Kennwerten eines fließenden Gewässers 1

Teil B

Referenzhandbuch

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	iii
Formelzeichen.....	iii
Indizes	iv
1 Einleitung	1
2 Hydraulische Grundlagen	2
2.1 Geometrie eines Flussquerprofils.....	3
2.2 Fließformeln.....	3
2.2.1 Fließformel nach Manning-Strickler	4
2.2.2 Fließformel nach Chezy.....	5
2.2.3 Fließformel nach Darcy-Weisbach	5
2.3 Umrechnung der Rauigkeiten.....	7
2.3.1 Rauigkeitsansatz nach Strickler.....	7
2.3.2 Rauigkeitsansatz nach Chezy	7
2.3.3 Rauigkeitsansatz nach Manning.....	7
2.3.4 Rauigkeitsansatz nach Nikuradse.....	7
2.4 Hydraulische Berechnung.....	10
2.4.1 Fließformel nach Manning-Strickler für gegliederte Flussquerprofile.....	10
2.4.2 Hydraulische Berechnung bei bekanntem Reibungsgefälle	11
2.4.3 Hydraulische Berechnung bei bekanntem Wasserspiegel.....	11
2.5 Berechnung der kritischen Abflusshöhe.....	12
2.6 Berechnung der mittleren Energiehöhe	12
2.7 Weitere hydraulische Kennwerte	13
2.7.1 Sohlschubspannung	13
2.7.2 Sohlschubspannungsgeschwindigkeit.....	13
2.7.3 Froude-Zahl	13
2.8 Aufbereitung der hydraulischen Ergebnisse.....	15
3 Sedimentologische Grundlagen.....	16
3.1 Korngrößenverteilung.....	16
3.1.1 Charakteristische Korndurchmesser	18
3.2 Hiding-Exposure-Korrektur	18

3.3	Allgemeine sedimentologische Kennwerte	21
3.3.1	Korn-Reynolds-Zahl.....	21
3.3.2	Dimensionsloser Korndurchmesser	21
3.3.3	Sinkgeschwindigkeit.....	21
3.3.4	Rouse-Zahl.....	22
3.3.5	Kornrauigkeit und Korrektur der Kornschubspannung.....	22
3.3.6	Dimensionsloser Shields-Parameter (Korn-Froude-Zahl)	23
3.3.7	Kritischer Shields-Parameter	24
3.3.8	Kritische Schubspannung	25
3.4	Sedimenttransport nach Meyer-Peter und Müller.....	25
3.5	Sedimenttransport nach Van Rijn.....	26
3.6	Sedimenttransport nach Wu et al	26
3.7	Sedimenttransport nach Engelund-Hansen.....	27
3.8	Sedimenttransport nach Yang	27
3.8.1	Transportformel nach Yang für Sand mit $d_k < 2 \text{ mm}$	28
3.8.2	Transportformel nach Yang für Kies mit $d_k \geq 2 \text{ mm}$	29
3.9	Umrechnung zwischen Einheiten der Transportkapazität	30
	Literaturverzeichnis	31
	Abbildungsverzeichnis	33
	Tabellenverzeichnis	34

Verzeichnis der Abkürzungen

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Durchflossener Querschnitt
b	m	Breite in Wasserspiegellage
C	$m^{1/2}/s$	Proportionalitätsfaktor nach Chezy
C_t	ppm	Sedimentkonzentration
d	m	Korndurchmesser
D_*	–	Dimensionsloser Korndurchmesser
d_{10}, d_{50}, d_{90}	m	Korndurchmesser bei 10 %, 50 %, 90 % Siebdurchgang
d_m	m	Mittlerer Korndurchmesser
E	m	Energiehöhe
Fr	–	Froude-Zahl
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
K	m^3/s	Transportvermögen
k_s	m	Äquivalente Sandrauigkeit nach Nikuradse
k_{st}	$m^{1/3}/s$	Rauigkeit nach Strickler
k'_{st}	$m^{1/3}/s$	Kornrauigkeit nach Strickler
k''_{st}	$m^{1/3}/s$	Formrauigkeit nach Strickler
m	–	Parameter zur Bestimmung des Hiding-Exposure-Faktors
M	–	Faktor für Sedimenttransport nach Yang
n	–	Parameter zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit
n	$s/m^{1/3}$	Rauigkeit nach Manning
n'	$s/m^{1/3}$	Kornrauigkeit nach Manning
N	–	Faktor für Sedimenttransport nach Yang
P	–	Siebdurchgang einer Korngruppe in Massenprozent
p_b	–	Fraktion einer Korngruppe in Massenprozent
p_e	–	Exposure-Faktor einer Korngruppe
p_h	–	Hiding-Faktor einer Korngruppe
Q	m^3/s	Abfluss
q_b	m^2/s	Sedimentkapazität in Volumen pro Breite und Zeit
q_{b^*}	$N/m/s$	Sedimentkapazität in Masse pro einem Meter und Zeit
Q_s	kg/s	Gesamt-Sedimentkapazität in Masse pro Zeit
$Q_{s,b}$	kg/s	Sedimentkapazität der Korngruppe in Masse pro Zeit
R	m	Hydraulischer Radius
Re	–	Reynolds-Zahl
Re_*	–	Korn-Reynolds-Zahl
S_0	–	Sohlgefälle
S_f	–	Reibungsgefälle
S	–	Gefälle
t	m	Wassertiefe
T	–	Transport-stage-Parameter

U	m	Benetzter Umfang
u_*	m/s	Sohlschubspannungsgeschwindigkeit
v	m/s	Fließgeschwindigkeit
v_c	m/s	Kritische Fließgeschwindigkeit für Bewegungsbeginn
W	m	Absolute Wasserspiegelhöhe
w	m/s	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
x	m	Horizontale Koordinate des Flussquerprofils
z	m	Vertikale Absolut-Koordinate des Flussquerprofils
α	–	Energiekorrekturkoeffizient
α	–	Faktor für Meyer-Peter und Müller
γ_s	N/m^3	Spezifische Wichte des Sediments
γ_w	N/m^3	Spezifische Wichte des Wassers
Δe	m	Scheiteldifferenz
ζ	–	Rouse-Zahl
η	–	Hiding-Exposure-Faktor
θ	–	Shields-Parameter
θ_c	–	Kritischer Shields-Parameter
κ	–	Von Karman-Konstante
λ	–	Reibungsbeiwert nach Darcy-Weisbach
μ	–	Korrekturfaktor der Kornschubspannung
ν	m^2/s	Kinematische Viskosität des Wassers
ρ_s	kg/m^3	Dichte des Sediments
ρ_w	kg/m^3	Dichte des Wassers
τ'	N/m^2	Kornschubspannung
τ''	N/m^2	Formschubspannung
τ_0	N/m^2	Sohlschubspannung
$\tau_{c,k}$	N/m^2	Kritische Schubspannung
ω_s	m/s	Sinkgeschwindigkeit

Indizes

<i>left</i>	Linkes Vorland, LVL
<i>channel</i>	Hauptgerinne, HG
<i>right</i>	Rechtes Vorland, RVL
<i>total</i>	Gesamtes Flussquerprofil
<i>gr</i>	Grenzzustand
<i>i</i>	Laufindex für Rauigkeitsbereiche
<i>j</i>	Benachbarte Korngruppe im Oberwasser
<i>k</i>	Korngruppe

1 Einleitung

In diesem Handbuch werden allgemeine Grundlagen sowie hydraulische und sedimentologische Berechnungsgrundlagen vorgestellt, die im Bed Load Analyzer zur Anwendung kommen.

Die hydraulischen Grundlagen, d. h. die Flussquerschnittsgeometrie, die Fließformel nach Manning-Strickler, die Umrechnung verschiedener Rauigkeiten auf die Strickler-Rauigkeit, die Berechnung des Wasserspiegels und der kritischen Abflusshöhe, die Berechnung der Energielinienhöhe sowie die Berechnung allgemeiner hydraulischer Parameter werden in Kapitel 2 erläutert.

Über die sedimentologischen Grundlagen gibt Kapitel 3 einen Überblick. Dort werden die Sieblinie eines Sedimentgemisches, die Hiding-Exposure-Korrektur und allgemeine sedimentologische Kennwerte beschrieben und anschließend auf die im Bed Load Analyzer implementierten Transportformeln eingegangen.

2 Hydraulische Grundlagen

Das Schema der hydraulischen Berechnung ist in Abbildung 1 dargestellt. Werte für die Dichte von Wasser, die Erdbeschleunigung und die Von Karman-Konstante sind fest vorgegebene Größen. Vom Benutzer einzugeben sind die Koordinaten des Flussquerschnitts als x/z -Wertepaare, die Grenzen des Hauptgerinnes, die hydraulischen Lastfälle, der Rauigkeitsansatz und die Rauigkeiten für das linke Vorland, das Hauptgerinne und das rechte Vorland.

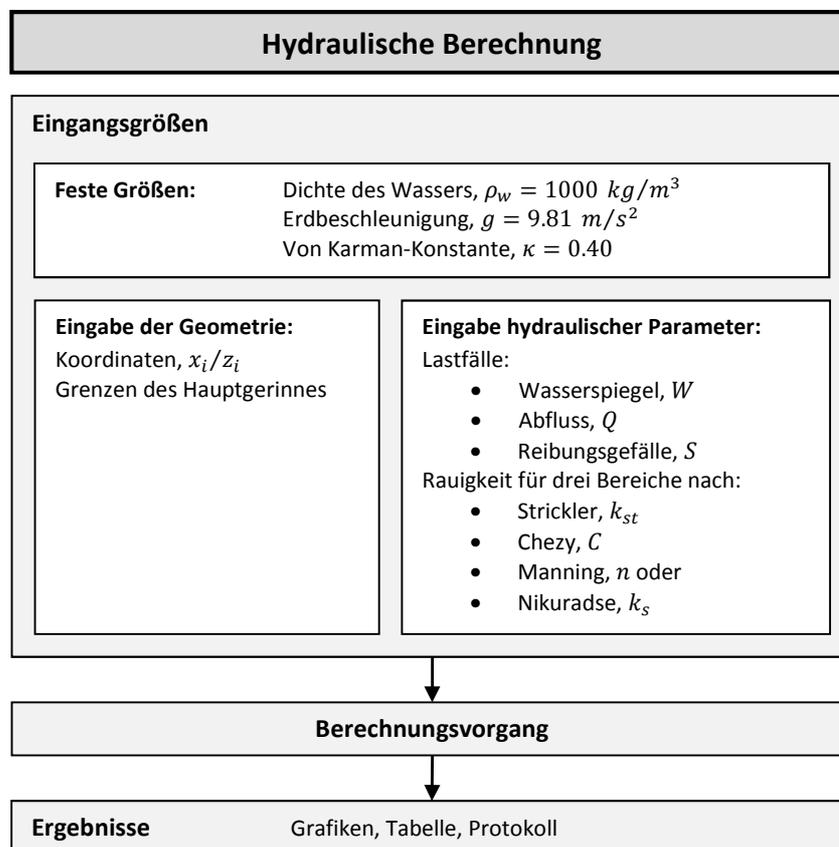


Abbildung 1: Dateneingabe und -ausgabe der hydraulischen Berechnung

Nach durchgeführter Berechnung stehen Ergebnisse in Form von Grafiken, einer Ergebnistabelle und einem Ergebnisprotokoll zur Verfügung. Die Ergebnisse der hydraulischen Berechnung dienen als Grundlage für die eventuell durchzuführende sedimentologische Berechnung.

2.1 Geometrie eines Flussquerprofils

Bei der Querprofilgeometrie handelt es sich um gegliederte Querschnitte, welche in die drei Rauigkeitsbereiche

- Linkes Vorland, LVL
- Hauptgerinne, HG
- Rechtes Vorland, RVL

unterteilt sind. Abbildung 2 zeigt schematisch ein Flussquerprofil mit den wichtigsten Parametern.

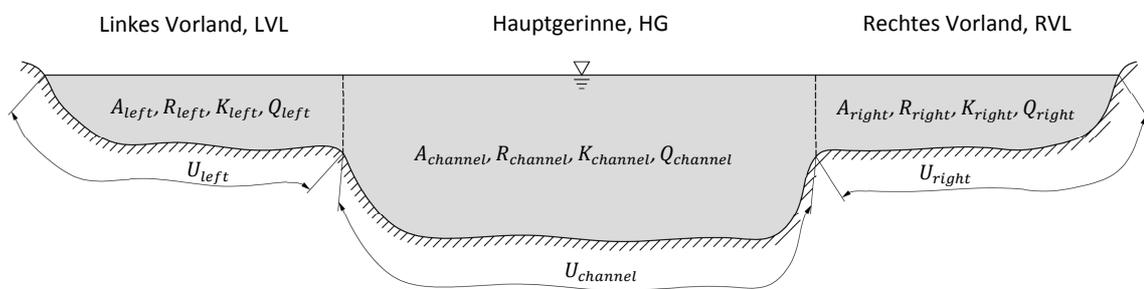


Abbildung 2: Gegliedertes Flussquerprofil

Die hydraulische Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung der drei Rauigkeitsbereiche. Weiters werden auch Kennwerte bezogen auf den Gesamtquerschnitt (z. B. die Energielinienhöhe) ermittelt. Die sedimentologische Berechnung bezieht sich auf den sedimentführenden Bereich des Flussquerprofils, also auf das Hauptgerinne.

2.2 Fließformeln

Eine Fließformel beschreibt den Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit, den geometrischen Bedingungen und dem Reibungsgefälle. Es existiert eine Vielzahl verschiedener empirischer Fließformeln.

Die bedeutendsten sind jedoch die Fließformeln nach:

- Manning-Strickler
- Darcy-Weisbach
- Chezy

2.2.1 Fließformel nach Manning-Strickler

Die Fließformel nach Manning-Strickler¹, benannt nach dem irischen Ingenieur Robert Manning (1816-1897) und dem schweizer Wasserbauer Albert Strickler (1887-1963), ist ein empirischer Ansatz, der sich durch eine Vielzahl von Feldmessungen bewährt hat:

$$v = k_{st} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

Der Strickler-Beiwert bzw. Manning's n (Kehrwert des Strickler-Beiwertes) hat den Vorteil, dass das Gerinne mit einem einzigen konstanten Wert beschrieben werden kann. Die Rauigkeit ist also unabhängig von der durchflussabhängigen Wassertiefe. Diese Tatsache bringt mit sich, dass der Ansatz nach Manning-Strickler rein auf den hydraulisch rauen Bereich limitiert ist, was allerdings in der wasserbaulichen Praxis meist der Fall ist.

Für die hydraulische Berechnung im Bed Load Analyzer wird unabhängig vom gewählten Rauigkeitsansatz die Fließformel nach Manning-Strickler herangezogen. Deshalb werden nachfolgend die wichtigsten geometrischen und hydraulischen Beziehungen erläutert.

Der hydraulische Radius R ergibt sich als Verhältnis zwischen dem durchflossenen Profilquerschnitt A und dem benetzten Umfang U :

$$R = \frac{A}{U} \quad (2)$$

¹ oft auch bezeichnet als Gauckler-Manning-Strickler-Formel

Mit der Kontinuitätsgleichung

$$Q = v A \quad (3)$$

und dem Zusammenhang zwischen Abfluss Q und dem Reibungsgefälle S

$$Q = K \sqrt{S} \quad (4)$$

sowie der Fließformel nach Manning-Strickler nach Gl. (1) kann das hydraulische Transportvermögen K in Abhängigkeit der Rauigkeit k_{st} und der Geometrie (gegeben durch den hydraulischen Radius R und dem durchflossenen Profilquerschnitt A) hergeleitet werden:

$$K = k_{st} R^{2/3} A \quad (5)$$

Dieser Zusammenhang wird in Abschnitt 2.4.1 bei der hydraulischen Berechnung für gegliederte Flussquerprofile zur Anwendung kommen.

2.2.2 Fließformel nach Chezy

Antoine Chezy (1718-1798) war ein französischer Hydrauliker und entwickelte zusammen mit Albert Brahms (1692-1758) die nach ihm benannte Fließformel nach Chezy:

$$v = C R^{1/2} S^{1/2} \quad (6)$$

Dabei ist der Proportionalitätsfaktor C ein konstanter Wert in der Einheit $m^{1/2}/s$ und wird auch Chezy-Koeffizient genannt. Diese Fließformel ist die Grundform der im mitteleuropäischen Raum häufig verwendeten Fließformel nach Manning-Strickler.

2.2.3 Fließformel nach Darcy-Weisbach

Die Fließformel nach Darcy-Weisbach wurde vom französischen Hydrauliker Henry Darcy (1803-1858) und dem deutschen Maschinenbauingenieur Julius Weisbach (1806-1871) entwickelt. Diese Fließformel kommt eigentlich aus der Rohrhydraulik, lässt sich aber mit Hilfe des hydraulischen Radius auch auf offene Gerinne näherungsweise anwenden:

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} R^{1/2} S^{1/2} \tag{7}$$

Der Reibungsbeiwert bzw. die Widerstandszahl λ ist abhängig von der Reynolds-Zahl Re und der äquivalenten Sandrauigkeit k_s nach Nikuradse und wird im Moody-Diagramm (Abbildung 3) dargestellt. Relevant für offene Gerinne ist der hydraulisch raue Bereich, in dem der Reibungsbeiwert mit der Formel nach Colebrook-White berechnet werden kann:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \log \left(3.71 \frac{4R}{k_s} \right) \tag{8}$$

Zu beachten ist, dass sich der Reibungsbeiwert λ mit der Wassertiefe ändert, also nicht konstant ist.

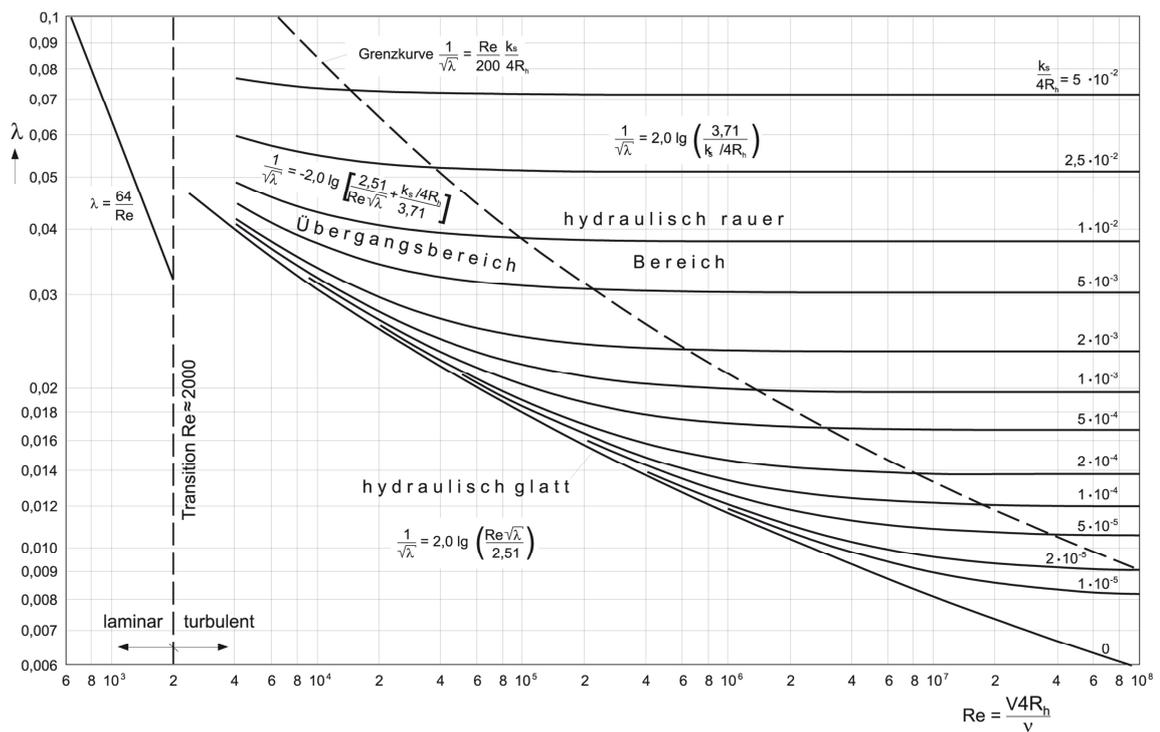


Abbildung 3: Moody-Diagramm (Jirka & Lang, 2009)

2.3 Umrechnung der Rauigkeiten

Die hydraulische Berechnung erfolgt mit der Fließformel nach Manning-Strickler laut Gl. (1), welche die Strickler-Rauigkeit verlangt. Wird ein von der Strickler-Rauigkeit abweichender Rauigkeitsansatz gewählt, wird die Rauigkeit von dem gewählten Rauigkeitsansatz in die Strickler-Rauigkeit umgerechnet.

2.3.1 Rauigkeitsansatz nach Strickler

In Tabelle 1 sind übliche Strickler-Beiwerte für offene Gerinne zusammengefasst, wobei das Hauptaugenmerk auf die Beiwerte von natürlichen Wasserläufen gelegt werden soll. Die in den Bed Load Analyzer eingegebenen Strickler-Beiwerte werden ohne Umrechnung direkt übernommen.

2.3.2 Rauigkeitsansatz nach Chezy

Die Umrechnung vom Chezy-Koeffizienten C in die Strickler-Rauigkeit erfolgt mit folgendem Zusammenhang:

$$k_{st} = C R^{-1/6} \quad (9)$$

2.3.3 Rauigkeitsansatz nach Manning

Die Rauigkeit nach Manning (Manning's n) ist der Kehrwert der Strickler-Rauigkeit:

$$k_{st} = \frac{1}{n} \quad (10)$$

2.3.4 Rauigkeitsansatz nach Nikuradse

Die äquivalente Sandrauigkeit k_s nach Nikuradse wird folgendermaßen in die Strickler-Rauigkeit umgerechnet:

$$k_{st} = 2 \sqrt{8g} \log \left(\frac{3.71 \cdot 4 R}{k_s} \right) R^{-1/6} \quad (11)$$

Der Zusammenhang bezieht sich auf die Formel nach Colebrook-White für den hydraulisch rauen Bereich. Werte für die äquivalente Sandrauigkeit k_s sind in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Strickler-Beiwert k_{st} für verschiedene Gerinnetypen (Naudascher, 1992)

Erdkanäle	$k_{st} [m^{1/3}/s]$
Erdkanäle in festem Material, glatt	60
Erdkanäle in festem Sand mit etwas Ton oder Schotter	50
Erdkanäle mit Sohle aus Sand und Kies, gepflasterte Böschungen	45-50
Erdkanäle aus Feinkies, etwa 10/20/30 mm	45
Erdkanäle aus mittlerem Kies, etwa 20/40/60 mm	40
Erdkanäle aus Grobkies, etwa 50/100/150 mm	35
Erdkanäle aus scholligem Lehm	30
Erdkanäle, mit groben Steinen angelegt	25-30
Erdkanäle aus Sand, Lehm oder Kies, stark bewachsen	20-25
Felskanäle	$k_{st} [m^{1/3}/s]$
Mittelgrober Felsausbruch	25-30
Felsausbruch bei sorgfältiger Sprengung	20-25
Sehr grober Felsausbruch, große Unregelmäßigkeiten	15-20
Gemauerte Kanäle	$k_{st} [m^{1/3}/s]$
Kanäle aus Ziegelmauerwerk, auch Klinker, gut gefugt	80
Bruchsteinmauerwerk	70-80
Kanäle aus Mauerwerk (normal)	60
Normales (gutes) Bruchsteinmauerwerk, behauene Steine	60
Grobes Bruchsteinmauerwerk, Steine nur grob behauen	50
Bruchsteinwände mit Sohle aus Sand und Kies	45-50
Betonkanäle	$k_{st} [m^{1/3}/s]$
Zementglattstrich	100
Beton bei Verwendung von Stahlschalung	90-100
Glattverputz	90-95
Beton geglättet	90
Gute Verschalung, glatter Zementputz, glatter Beton	80-90
Beton bei Verwendung von Holzschalung, ohne Verputz	65-70
Stampfbeton mit glatter Oberfläche	60-65
Alter Beton, unebene Flächen	60
Betonschalen mit 150-200 kg Zement je m^3 , je nach Zustand	50-60
Grobe Betonauskleidung	55
Ungleichmäßige Betonflächen	50

Tabelle 1 (Fortsetzung): Strickler-Beiwert k_{st} für verschiedene Gerinntypen (Naudascher, 1992)

Natürliche Wasserläufe	k_{st} [$m^{1/3}/s$]
Natürliche Flussbetten mit fester Sohle, ohne Unregelmäßigkeiten	40
Natürliche Flussbetten mit mäßigem Geschiebe	33-35
Natürliche Flussbetten, verkrautet	30-35
Natürliche Flussbetten mit Geröll und Unregelmäßigkeiten	30
Natürliche Flussbetten, stark geschiebeführend	28
Wildbäche mit grobem Geröll, bei ruhendem Geschiebe	25-28
Wildbäche mit grobem Geröll, bei sich bewegendem Geschiebe	19-22

Tabelle 2: Äquivalente Sandrauigkeiten k_s diverser Gerinntypen (DVWK, 1991)

Ebene Fließgewässersohle aus	k_s [mm]
Sand oder Kies	d_{90}
Grobkies bis Schotter	60-200
Schwere Steinschüttung	200-300
Sohlenpflasterung (Grenzbedingung für Einzelrauigkeiten: $k_s \leq 0.45 R$)	30-50
Vorländer und Böschungen mit	k_s [mm]
Ackerboden	20-250
Ackerboden mit Kulturen	250-800
Waldboden	160-320
Rasen	60
Steinschüttung 80/450 mm mit Gras überwachsen	300
Gras	100-350
Gras und Stauden	130-400
Rasengittersteine	15-30
Wände aus	k_s [mm]
Ziegelmauerwerk	2-8
Beton glatt	1-6
Beton rau	6-20
Bruchstein	15-20
raue Natursteinmauer	80-100
Stahlpundwand je nach Profiltiefe	20-100

2.4 Hydraulische Berechnung

Die hydraulische Berechnung kann für stationär-gleichförmigen Abfluss (Normalabfluss) und ungleichförmigen Abfluss (Wasserspiegel bekannt) erfolgen. Bei stationär-gleichförmigen Abfluss entspricht das Reibungsgefälle S_f dem Sohlgefälle S_0 . Aus der Berechnung für ungleichförmigen Abfluss mit bekanntem Wasserspiegel erhält man das Reibungsgefälle S_f , welches aber nicht dem Sohlgefälle S_0 entspricht. In weiterer Folge wird das Gefälle allgemein mit S bezeichnet.

2.4.1 Fließformel nach Manning-Strickler für gegliederte Flussquerprofile

Die hydraulische Berechnung eines gegliederten Flussquerprofils erfolgt unter der Annahme, dass die Energiehöhe über den gesamten Querschnitt konstant ist. Es ergeben sich mit der Fließformel nach Manning-Strickler folgende hydraulische Transportvermögen:

$$K_{left} = k_{st,left} R_{left}^{2/3} A_{left} \quad (12a)$$

$$K_{channel} = k_{st,channel} R_{channel}^{2/3} A_{channel} \quad (12b)$$

$$K_{right} = k_{st,right} R_{right}^{2/3} A_{right} \quad (12c)$$

Das hydraulische Transportvermögen des gesamten Flussquerprofils K_{total} ergibt sich aus der Summe der Transportvermögen der drei Rauigkeitsbereiche:

$$K_{total} = \sum K_i = K_{left} + K_{channel} + K_{right} \quad (13)$$

Aus dem hydraulischen Transportvermögen des gesamten Flussquerprofils K_{total} kann nun der Abfluss des Gesamtprofils Q_{total} nach Gl. (14) errechnet werden. Dabei wird angenommen, dass die drei Rauigkeitsbereiche dasselbe mittlere Reibungsgefälle aufweisen.

$$Q_{total} = K_{total} \sqrt{S} \quad (14)$$

Somit ist der förderbare Abfluss des gesamten Flussquerprofils bekannt. Durch Anwenden von Gl. (4) können die Abflüsse der einzelnen Rauigkeitsbereiche ermittelt werden. In weiterer Folge können weitere hydraulische Kennwerte, wie z. B. die Energiehöhe oder die Froude-Zahl, berechnet werden.

2.4.2 Hydraulische Berechnung bei bekanntem Reibungsgefälle

Bei der Berechnung des Wasserspiegels für Normalabfluss bei bekanntem Reibungsgefälle handelt es sich um einen iterativen Prozess. Die Iteration erfolgt mit dem Verfahren nach Newton-Raphson, mit welchem aufgrund des quadratischen Konvergenzverhaltens nur wenige Iterationsschritte erforderlich sind, um das Berechnungsergebnis in ausreichender Genauigkeit zu erreichen. Ausgehend vom tiefsten Profilpunkt als Ausgangswasserspiegel werden in einem Iterationsschritt zunächst die Transportvermögen K_i für die einzelnen Rauigkeitsbereiche nach Gl. (12a) bis (12c) berechnet. Durch Summation der Transportvermögen nach Gl. (13) ergibt sich das Gesamttransportvermögen K_{total} , womit zusammen mit dem Reibungsgefälle S die Gesamtwassermenge Q_{total} nach Gl. (14) und somit ein neuer Wasserspiegel berechnet werden. Das Newton-Raphson-Verfahren wird abgebrochen, wenn ein vordefiniertes Abbruchkriterium in Form einer Abflussdifferenz zwischen berechnetem und eingegebenem Abfluss unterschritten wird.

2.4.3 Hydraulische Berechnung bei bekanntem Wasserspiegel

Bei bekanntem Wasserspiegel ist keine Iteration erforderlich. Die geometrischen Größen A_i , U_i und R_i können direkt ermittelt werden. Daraus können die Transportvermögen K_i nach Gl. (12a) bis (12c) errechnet werden. Durch Summation der Transportvermögen erhält man das Transportvermögen des Gesamtquerprofils K_{total} , mit welchem man gemeinsam mit dem Gesamtabfluss Q_{total} das Reibungsgefälle S nach Gl. (14) berechnen kann. Nun sind alle Werte der Fließformel bekannt und es können weitere Strömungskennwerte des Querprofils ausgewertet werden.

2.5 Berechnung der kritischen Abflusshöhe

Die kritische Abflusshöhe wird mittels eines iterativen Prozesses berechnet. Der iterative Prozess ist eine gewöhnliche Schleife, bei welcher in jedem Schleifendurchgang der Wasserspiegel vom tiefsten Profilmittel ausgehend um einen vordefinierten Wert von 0.001 m erhöht wird. Zu jedem dieser Wasserspiegel wird die Froude-Zahl berechnet. Erreicht die Froude-Zahl den Wert Eins, so wird der Schleifendurchgang abgebrochen und der zuletzt iterierte Wasserspiegel der kritischen Abflusshöhe zugewiesen.

2.6 Berechnung der mittleren Energiehöhe

Die mittlere kinetische Energiehöhe des Gesamtquerprofils wird als abflussgewichtete Energie der drei Rauigkeitsbereiche über den Energiekorrekturkoeffizienten α nach Gl. (15) berechnet. Die Berechnung des Koeffizienten basiert auf der Gewichtung der Abflüsse Q_i bzw. der Transportvermögen K_i der drei Rauigkeitsbereiche.

$$\alpha = \frac{\sum Q_i v_i^2}{Q_{total} v_{total}^2} = \frac{A_{total} \sum K_i^3 / A_i^2}{K_{total}^3} \quad (15)$$

Dabei ist v_{total} die mittlere Fließgeschwindigkeit des gesamten Querprofils und kann mit der Kontinuitätsgleichung nach Gl. (3) berechnet werden. Die mittlere Energiehöhe des Gesamtquerprofils ergibt sich nach Gleichung (16) aus dem Wasserspiegel addiert mit der um den Energiekorrekturkoeffizienten α gewichteten kinetischen Energiehöhe des Gesamtquerprofils.

$$E = W + \alpha \frac{v_{total}^2}{2g} \quad (16)$$

2.7 Weitere hydraulische Kennwerte

2.7.1 Sohlschubspannung

Eine gleichförmige Gerinneströmung ist durch das Kräftegleichgewicht zwischen der Gewichtskomponente in Fließrichtung und der Schubspannungskraft an der Sohle gegeben. Aus diesem Gleichgewicht kann man die Schubspannung an der Sohle ableiten und ergibt sich zu:

$$\tau_0 = \rho_w g R_{channel} S \quad (17)$$

2.7.2 Sohlschubspannungsgeschwindigkeit

Die Sohlschubspannungsgeschwindigkeit ist von der Sohlschubspannung abhängig und errechnet sich aus:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}} \quad (18)$$

2.7.3 Froude-Zahl

Die Froude-Zahl Fr ist das Verhältnis zwischen der Fließgeschwindigkeit v und der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit w :

$$Fr = \frac{v}{w} \quad (19)$$

Dabei ist die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit näherungsweise gegeben durch:

$$w \approx \sqrt{g t} \quad (20)$$

Hier ist t die mittlere Abflusstiefe des jeweiligen Rauigkeitsbereichs und errechnet sich aus dem Verhältnis zwischen dem durchflossenen Profilquerschnitt A und der Wasserspiegelbreite b :

$$t = \frac{A}{b} \tag{21}$$

Die Froude-Zahl Fr ermöglicht eine Aussage darüber, in welchem Fließzustand sich das Gewässer befindet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Zustände in Fließgewässern

	Schießen	Grenzzustand	Strömen
Fr	> 1	$= 1$	< 1
v	$> v_{gr}$	$= v_{gr}$	$< v_{gr}$
t	$< t_{gr}$	$= t_{gr}$	$> t_{gr}$

Im Grenzzustand, also wenn die Abflusstiefe t gleich der kritischen Abflusstiefe t_{gr} ist und die Fließgeschwindigkeit v gleich der kritischen Fließgeschwindigkeit v_{gr} ist, gilt $Fr = 1$. Der Grenzzustand ist durch den Extremwert der Energiekurve (Abbildung 4) definiert.

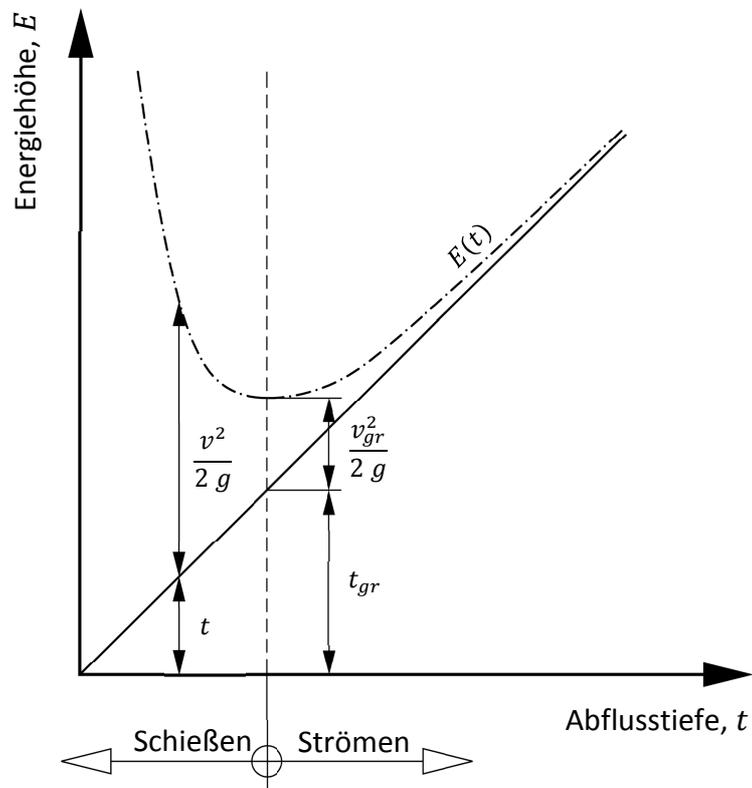


Abbildung 4: Energiekurve

2.8 Aufbereitung der hydraulischen Ergebnisse

Nach abgeschlossener hydraulischer Berechnung wird der Wasserspiegel bzw. die Abflusstiefe in 20 Inkremente gleicher Schrittweite geteilt. Für jedes Wasserspiegelinkrement wird ähnlich wie in Abschnitt 2.4.3 eine Berechnung bei bekanntem Wasserspiegel durchgeführt und die wichtigsten Ergebnisse gespeichert. Am Ende der Berechnung stehen hydraulische Kennwerte für 20 Wasserspiegellagen zur Verfügung, welche die Datenreihen des Pegelschlüssels darstellen.

3 Sedimentologische Grundlagen

Die sedimentologische Berechnung beinhaltet die Auswertung allgemeiner sedimentologischer Kennwerte sowie die Ermittlung der Geschiebemenge im Hauptgerinne über ausgewählte Sedimenttransportformeln. Als Eingangsgrößen dienen die Ergebnisse der hydraulischen Berechnung sowie Eigenschaften des Sediments wie Dichte und die Korngrößenverteilung (Abbildung 6, Seite 17).

3.1 Korngrößenverteilung

Die Berechnung des Geschiebetransports kann für einen charakteristischen Korndurchmesser oder für alle Durchmesser einer Korngrößenverteilung durchgeführt werden. Bei der Berechnung für einen charakteristischen Korndurchmesser wird eine Sedimenttransportformel (Abschnitte 3.4 bis 3.8) herangezogen und man erhält direkt die Sedimentkapazität für diesen Korndurchmesser. Will man hingegen die Sedimentkapazität einer Korngrößenverteilung ermitteln, muss für jede einzelne Korngruppe eine Sedimenttransportformel angewendet werden und die Gesamtkapazität aufsummiert werden. Abbildung 5 zeigt eine Korngrößenverteilung für Sand/Kies.

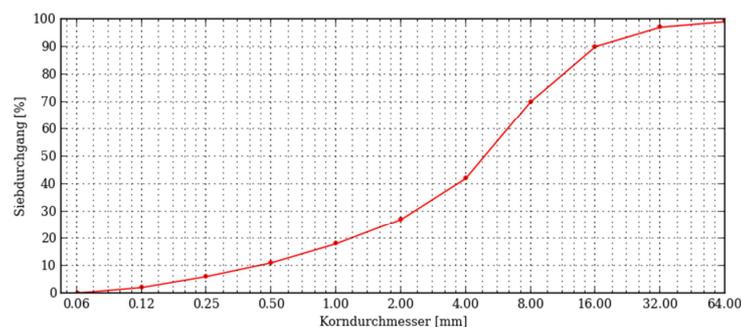


Abbildung 5: Korngrößenverteilung

Dabei ist der Siebdurchgang P_k in Massenprozent gegenüber dem Korndurchmesser d_k aufgetragen. Aus dieser Kurve erhält man für jeden Korndurchmesser die zugehörige Kornfraktion $p_{b,k}$ in Massenprozent:

$$p_{b,k} = P_{k-1} - P_k \quad (22)$$

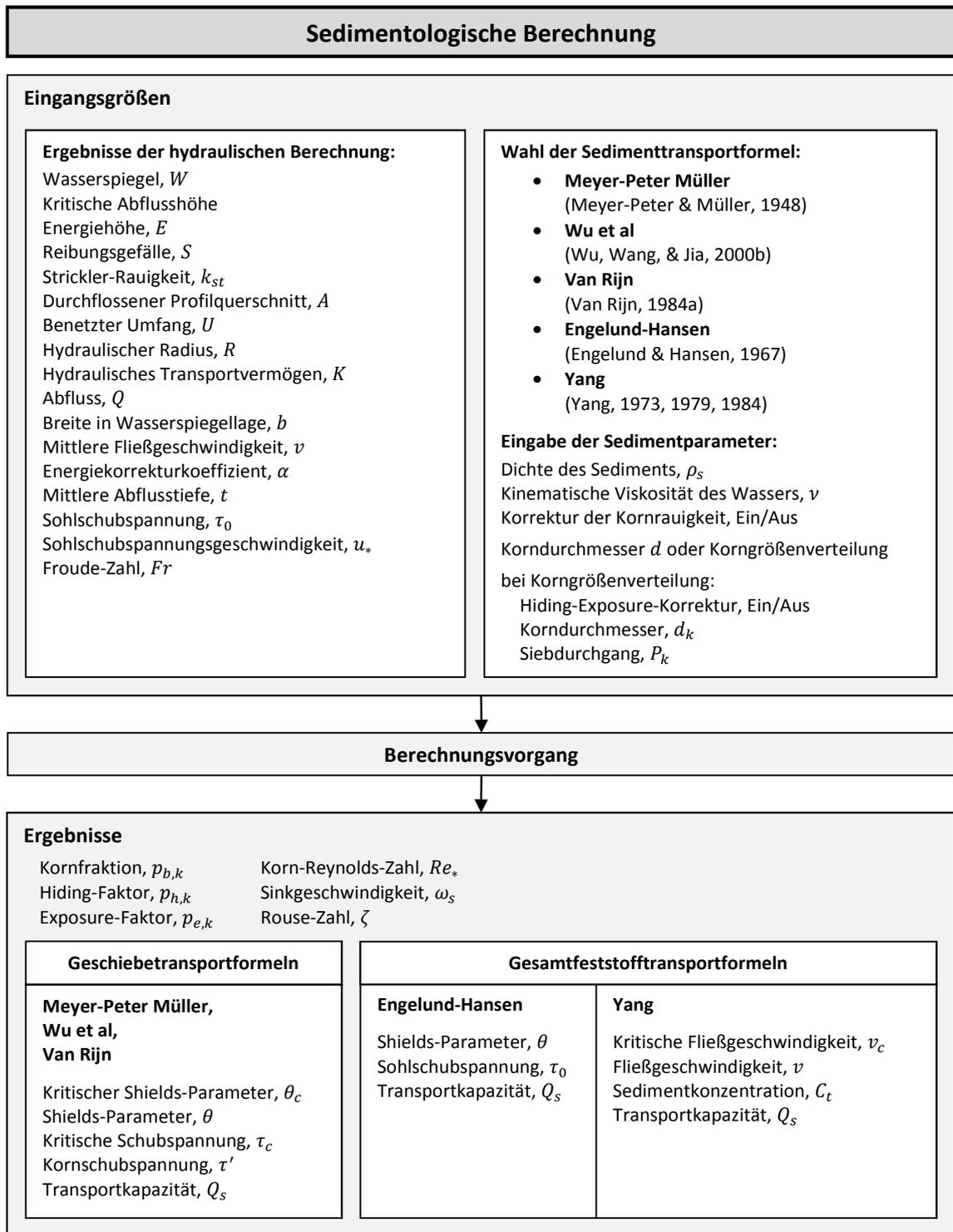


Abbildung 6: Dateneingabe und -ausgabe der sedimentologischen Berechnung

Die über eine Sedimenttransportformel ermittelte Sedimentkapazität $Q_{s,k}$ für eine Korngruppe wird mit der zugehörigen Kornfraktion $p_{b,k}$ multipliziert:

$$Q_{s,b} = Q_{s,k} p_{b,k} \quad (23)$$

Die gesamte Sedimentkapazität Q_s ergibt sich aus der Summe der einzelnen Sedimentkapazitäten der Kornfraktionen $Q_{s,b}$:

$$Q_s = \sum Q_{s,b} \quad (24)$$

3.1.1 Charakteristische Korndurchmesser

Aus der Korngrößenverteilung lassen sich charakteristische Korndurchmesser herauslesen bzw. ableiten. Der charakteristische Korndurchmesser d_{10} ist jener Durchmesser bei 10 % Siebdurchgang. Dies gilt sinngemäß gleich für die charakteristischen Korndurchmesser d_{50} und d_{90} . Ein weiterer charakteristischer Korndurchmesser ist der arithmetische Mittelwert der Korngrößen d_m (Meyer-Peter & Müller, 1948), der wie folgt definiert ist:

$$d_m = \frac{\sum d_k p_{b,k}}{\sum p_{b,k}} \quad (25)$$

3.2 Hiding-Exposure-Korrektur

Die Tatsache, dass größere Körner eher der Strömung ausgesetzt sind als kleinere, wird mit der Methode nach Wu berücksichtigt (Wu et al., 2000b).

Betrachtet man ein Gemenge von kugelförmigen Sedimentkörnern mit verschiedenen Durchmessern, hängen die Abhebe- und Schleppkräfte eines Sedimentkornes davon ab, wie es an der Sohle gelagert ist, d. h. ob es von anderen Körnern verdeckt ist oder der Strömung ausgesetzt ist. Die Position eines Kornes d_k kann durch den Höhenunterschied Δe (Abbildung 7) zwischen dem eigenen Scheitel und dem Scheitel des benachbarten Kornes d_j im Oberwasser beschrieben werden. Ist $\Delta e > 0$, ist das Korn d_k

exponiert, bei $\Delta e < 0$ ist es verdeckt. Die Scheiteldifferenz Δe kann einen Wert zwischen $-d_j$ und d_k annehmen. Da die Körner zufällig an der Sohle verteilt sind, ist die Scheiteldifferenz eine Zufallsvariable, für die eine gleichmäßige Wahrscheinlichkeitsverteilung angenommen wird.

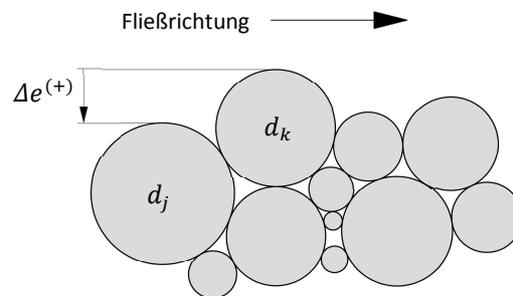


Abbildung 7: Definition der Scheiteldifferenz Δ_e

Es wird vorausgesetzt, dass die Wahrscheinlichkeit eines Kornes d_j vor einem Korn d_k zu bleiben, der Kornfraktion $p_{b,j}$ entspricht. Daraus lassen sich die Wahrscheinlichkeiten der Exposition der Körner d_k gegenüber der Körner d_j folgend beschreiben:

$$p_{hk,j} = p_{b,j} \frac{d_j}{d_k + d_j} \quad (26a)$$

$$p_{ek,j} = p_{b,j} \frac{d_k}{d_k + d_j} \quad (26b)$$

Die gesamten Hiding- und Exposure-Wahrscheinlichkeiten p_{hk} und p_{ek} eines Kornes d_k erhält man durch Aufsummierung über alle Korngruppen:

$$p_{hk} = \sum_{j=1}^N p_{b,j} \frac{d_j}{d_k + d_j} \quad (27a)$$

$$p_{ek} = \sum_{j=1}^N p_{b,j} \frac{d_k}{d_k + d_j} \quad (27b)$$

Dabei ist N die Gesamtanzahl der Korngruppen. Es gilt die Beziehung $p_{hk} + p_{ek} = 1$. Für einheitliche Körner ist $p_{hk} = p_{ek} = 0.5$. In einem ungleichkörnigen Sedimentgemisch gilt $p_{ek} \geq p_{hk}$ für grobe Körner und $p_{ek} \leq p_{hk}$ für feine Körner. Aus den Hiding-

und Exposure-Wahrscheinlichkeiten p_{hk} und p_{ek} ergibt sich der Hiding-Exposure-Faktor zu

$$\eta_k = \left(\frac{p_{ek}}{p_{hk}} \right)^{-m} \quad (28)$$

wobei m ein empirischer Parameter ist und sich aus Labor- und Feldversuchen zu $m = -0.6$ ergeben hat (Wu et al., 2000b).

Beispielhaft werden für die Korngrößen $d_4 = 8 \text{ mm}$ und $d_7 = 1 \text{ mm}$ aus der Korngrößenverteilung in Abbildung 5 die Hiding- und Exposure-Faktoren berechnet (Tabelle 4). Die Faktoren $p_{h4,j}$ und $p_{h7,j}$ werden mit Gl. (26a), die Faktoren $p_{e4,j}$ und $p_{e7,j}$ mit Gl. (26b) berechnet. Schließlich werden die Einzelfaktoren mit Gl. (27a) und (27b) ermittelt.

Tabelle 4: Exemplarische Berechnung von Hiding-Exposure-Faktoren für zwei Korngrößen d_4 und d_7

k	d_k [mm]	P_k [%]	$p_{b,k}$ [%]	$p_{h4,j}$	$p_{e4,j}$	$p_{h7,j}$	$p_{e7,j}$
1	64	99.0	1.0	0.009	0.001	0.010	0.000
2	32	97.0	2.0	0.016	0.004	0.019	0.001
3	16	90.0	7.0	0.047	0.023	0.066	0.004
4	8	70.0	20.0	0.100	0.100	0.178	0.022
5	4	42.0	28.0	0.093	0.187	0.224	0.056
6	2	27.0	15.0	0.030	0.120	0.100	0.050
7	1	18.0	9.0	0.010	0.080	0.045	0.045
8	0.5	11.0	7.0	0.004	0.066	0.023	0.047
9	0.25	6.0	5.0	0.002	0.048	0.010	0.040
10	0.125	2.0	4.0	0.001	0.039	0.004	0.036
11	0.063	0.0	2.0	0.000	0.020	0.001	0.019
Σ			100	p_{h4} 0.311	p_{e4} 0.689	p_{h7} 0.681	p_{e7} 0.319

Auch hier zeigt sich, dass bei groben Körnern ($d_4 = 8 \text{ mm}$) der Exposure-Faktor größer ist als der Hiding-Faktor ($p_{e4} = 0.689 > p_{h4} = 0.311$), und bei feineren Körnern ($d_7 = 1 \text{ mm}$) der Exposure-Faktor kleiner ist ($p_{e7} = 0.319 < p_{h7} = 0.681$). Die Beziehungen $p_{e4} + p_{h4} = 0.689 + 0.311 = 1$ und $p_{e7} + p_{h7} = 0.319 + 0.681 = 1$ werden erfüllt.

3.3 Allgemeine sedimentologische Kennwerte

Unabhängig von der gewählten Sedimenttransportformel werden zunächst allgemeine sedimentologische Kennwerte ermittelt. Diese werden folgend erläutert.

3.3.1 Korn-Reynolds-Zahl

Die Korn-Reynolds-Zahl Re_* gibt im Zusammenhang mit der Korn-Froude-Zahl (Shields-Parameter, siehe Abschnitt 3.3.6) Aussagen über den Beginn der Sedimentbewegung und ist definiert durch:

$$Re_* = \frac{u_* d_k}{\nu} \quad (29)$$

3.3.2 Dimensionsloser Korndurchmesser

Oft wird im Shields-Diagramm (Abbildung 8) der dimensionslose Korndurchmesser D_* anstatt der Korn-Reynolds-Zahl Re_* aufgetragen, um das Diagramm einfacher handhaben zu können:

$$D_* = d_k \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{g}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (30)$$

Der kritische Shields-Parameter θ_c (siehe Abschnitt 3.3.7) hängt vom dimensionslosen Korndurchmesser ab.

3.3.3 Sinkgeschwindigkeit

Die Sinkgeschwindigkeit des Sedimentpartikels errechnet sich mit den Koeffizienten $N = 0.98$, $M = 33.9$ und $n = 1.33$ für natürlich geformte Sedimentpartikel mit dem Corey-Formfaktor von 0.7 nach Wu und Wang (2006) zu:

$$\omega_s = \frac{M \nu}{N d_k} \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{4 N}{3 M^2} D_*^3 \right)^{1/n}} - \frac{1}{2} \right]^n \quad (31)$$

3.3.4 Rouse-Zahl

Die Rouse-Zahl ζ ist das Verhältnis zwischen Sinkgeschwindigkeit ω_s und Sohl-schubspannungsgeschwindigkeit u_* und ist ein Maß für die Art der Sedimentbewegung:

$$\zeta = \frac{\omega_s}{\kappa u_*} \quad (32)$$

Dabei ist κ die Von Karman-Konstante und wird mit einem Wert von 0.40 (hängt vom logarithmischen Geschwindigkeitsprofil ab) eingesetzt. Man kann die Rouse-Zahl ζ auch als Relation zwischen der Schwerkraft und der Stärke der Turbulenz (proportional zu u_*), die auf das schwebende Partikel wirkt, betrachten. Dieser Kennwert gibt eine Abschätzung, ob das Sediment tendenziell als Geschiebe oder als Schwebstoff bzw. als Kombination aus beiden transportiert wird. Tabelle 5 zeigt Bereiche der Rouse-Zahl ζ mit der zugehörigen Tendenz des Sedimenttransports (Whipple, 2004).

Tabelle 5: Bereiche der Rouse-Zahl (Whipple, 2004)

Bereich der Rouse-Zahl	Art der Bewegung
≥ 2.5	Geschiebetransport
$1.2 \leq \zeta < 2.5$	50 % Schwebstofftransport
$0.8 \leq \zeta < 1.2$	100 % Schwebstofftransport
< 0.8	"Wash Load"

3.3.5 Kornrauigkeit und Korrektur der Kornschubspannung

Für Flusssohlen mit Sandsedimenten und Sohlformen (alluviale Flussbette) wird zwischen der Kornrauigkeit k'_{st} und der Formrauigkeit k''_{st} bzw. zwischen Kornschubspannung τ' und Formschubspannung τ'' unterschieden. Für sandige Flussbette ist für den lokalen Sedimenttransport nur die Kornschubspannung τ' wirksam.

Aus der hydraulischen Sohlrauigkeit k_{st} kann die vom Korndurchmesser d_{50} abhängige Kornrauigkeit k'_{st} berechnet werden (Wu et al., 2000b), wobei im Bed Load Analyzer anstatt d_{50} der Korndurchmesser d_k herangezogen wird:

$$k'_{st} = \frac{20}{(d_{50})^{1/6}} \quad (33)$$

Anzumerken ist, dass es verschiedene Methoden gibt, die Kornrauigkeit k'_{st} zu berechnen. Ein anderer Ansatz, der im Bed Load Analyzer aber nicht verwendet wird, wäre (Meyer-Peter & Müller, 1948):

$$k'_{st} = \frac{26}{(d_{90})^{1/6}} \quad (34)$$

Mit der Kornrauigkeit k'_{st} aus Gl. (33) kann nun der Korrekturfaktor μ der Kornschubspannung bestimmt werden (Meyer-Peter & Müller, 1948):

$$\mu = \left(\frac{k_{st}}{k'_{st}} \right)^{3/2} = \left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \quad (35)$$

Für die Berechnung der Kornschubspannung τ' wird die aus der hydraulischen Berechnung ermittelte Sohlschubspannung τ_0 mit dem Korrekturfaktor μ korrigiert:

$$\tau' = \mu \tau_0 = \mu \rho_w g R S \quad (36)$$

Die dargestellte Korrektur der Sohlschubspannung kann für die Geschiebetransportformeln nach Meyer-Peter Müller und Van Rijn angewendet werden. In der Geschiebetransportformel nach Wu et al ist diese Korrektur fest implementiert.

3.3.6 Dimensionsloser Shields-Parameter (Korn-Froude-Zahl)

Der Nachweis der Sohlstabilität nach Shields basiert auf dem Konzept der kritischen Schleppspannungen (Shields, 1936). Von Shields wurden umfangreiche empirische Untersuchungen durchgeführt, um die dimensionslose kritische Sohlschubspannung zu bestimmen. Die Ergebnisse können in einem einzigen Diagramm dargestellt werden (Abbildung 8). In diesem Diagramm ist der Shields-Parameter θ (auch Korn-Froude-Zahl) in Abhängigkeit von der Korn-Reynolds-Zahl Re_* aufgetragen.

Der Shields-Parameter ergibt sich zu

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w) g d_k} \quad (37)$$

wobei $\tau = \tau_0$ bzw. $\tau = \tau'$ ist.

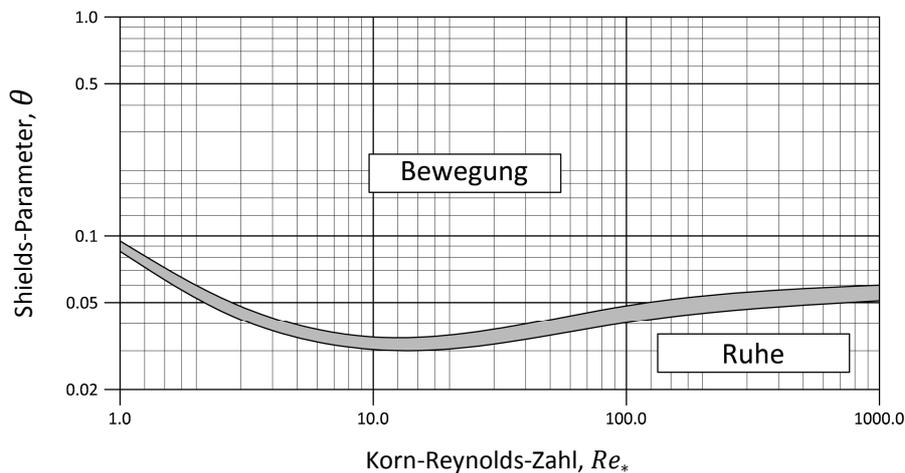


Abbildung 8: Sohlstabilität nach Shields (1936)

3.3.7 Kritischer Shields-Parameter

Allgemein gesehen ist der von der Korn-Reynolds-Zahl Re_* abhängige kritische Shields-Parameter θ_c jener Wert, bei dem Bewegungsbeginn eintritt. Die Sedimenttransportformel nach Meyer-Peter Müller verwendet einen konstanten kritischen Shields-Parameter mit einem Wert von 0,047 (Meyer-Peter & Müller, 1948), Wu et al rechnet mit einem konstanten Wert von 0,03 (Wu et al., 2000b). In der Sedimenttransportformel nach Van Rijn hängen die kritischen Shields-Parameter vom dimensionslosen Korndurchmesser D_* ab und sind wie folgt definiert (Van Rijn, 1984a):

$$\theta_c = \begin{cases} 0,24 D_*^{-1}, & D_* \leq 4 \\ 0,14 D_*^{-0,64}, & 4 < D_* \leq 10 \\ 0,04 D_*^{-0,1}, & 10 < D_* \leq 20 \\ 0,013 D_*^{0,29}, & 20 < D_* \leq 150 \\ 0,055, & D_* > 150 \end{cases} \quad (38)$$

3.3.8 Kritische Schubspannung

Durch Umformen von Gl. (37) und Einführen des Hiding-Exposure-Effekts kann die kritische Schubspannung ermittelt werden (Wu et al., 2000b):

$$\tau_c = \theta_c \eta_k (\rho_s - \rho_w) g d_k \quad (39)$$

Übersteigt die Kornschubspannung τ' die kritische Schubspannung τ_c , kommt es zur Sedimentbewegung.

3.4 Sedimenttransport nach Meyer-Peter und Müller

Diese Sedimenttransportformel entstand auf Grundlage von zahlreichen experimentellen Versuchen in Flüssen mit relativ groben Sedimenten und Bereichen mit voll entwickelter Turbulenz (Meyer-Peter & Müller, 1948):

$$q_{b,k^*} = \alpha \left[\frac{\mu \tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w) d_k} - \theta_c \right]^{3/2} \gamma_s \left[\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) g d_k^3 \right]^{1/2} \quad (40)$$

Die Transportkapazität ist dabei proportional zur Differenz zwischen der mittleren Kornschubspannung und der kritischen Schubspannung τ_c . Die Versuche wurden bei folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Sohlneigung: 0.4 ÷ 20 ‰
- Korngrößen (d bzw. d_m): 0.4 ÷ 30 mm
- Mittlere Fließgeschwindigkeit: 0.37 ÷ 2.87 m/s

Es stellte sich heraus, dass der Sedimenttransport im Allgemeinen von der Schubspannung als maßgebende Größe abhängig ist. Die empirische Transportformel nach Gl. (40) und die experimentellen Versuche, welche in verschiedenen Maßstäben durchgeführt wurden, zeigten, dass das Gesetz der Ähnlichkeit gilt und der Ansatz somit unter natürlichen Bedingungen mit ausreichender Genauigkeit für praktische Verwendungszwecke angewendet werden kann (Meyer-Peter & Müller, 1948).

Der kritische Shields-Parameter θ_c wird konstant mit 0.047 eingesetzt, da die Korn-Reynolds-Zahl Re_* bei allen durchgeführten Versuchen hoch war ($Re_* > 100$) und sich

der kritische Shields-Parameter in diesem Bereich kaum noch ändert. Der Faktor α wird mit folgender Beziehung definiert (Wiberg & Smith, 1989):

$$\alpha = 9.64 \left[\frac{\mu \tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w) d_k} \right]^{5/3} \quad (41)$$

3.5 Sedimenttransport nach Van Rijn

Die Transportformel nach Van Rijn basiert auf physikalischen Modellversuchen, bei denen das Geschiebe von Korndurchmessern im Größenbereich von 0.2 bis 2 mm untersucht wurden. Die Transportkapazität ergibt sich aus dem dimensionslosen Korndurchmesser D_* aus Gl. (30) und dem Parameter T aus Gl. (43) zu (Van Rijn, 1984a):

$$q_{b,k} = 0.053 \frac{d_k^{1.5} T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g} \quad (42)$$

Der Parameter T ist ein Zusammenhang zwischen der Kornschubspannung $\tau' = \mu \tau_0$ nach Gl. (36) und der kritischen Schubspannung τ_c aus Gl. (39):

$$T = \frac{\mu \tau_0}{\tau_c} - 1 \quad (43)$$

3.6 Sedimenttransport nach Wu et al

Wu et al (2000b) führen die Fähigkeit eines Kornes ein, sich der Strömung auszusetzen oder ihr zu entgehen. So kommt ein kleines Korn eher nicht in Bewegung, da es sich hinter einem größeren Korn befindet (siehe Abschnitt 3.2). Dieser Effekt wird bei der Berechnung der kritischen Schubspannung τ_c nach Gl. (39) berücksichtigt. Die Transportformel nach Wu et al ist demnach ein Ansatz, der den Sedimenttransport eines Korngemischs ermittelt (Wu et al., 2000b):

$$q_{b,k} = 0.0053 \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \frac{\tau_0}{\tau_c} - 1 \right]^{2.2} p_{b,k} \left[\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) g d_k^3 \right]^{1/2} \quad (44)$$

Dabei wird für die Berechnung der kritischen Schubspannung τ_c ein Wert von $\theta_c = 0.03$ herangezogen. Die Korrektur der Kornrauigkeit nach Abschnitt 3.3.5 ist in der Formel bereits fest enthalten. Die Transportformel ist für folgende Bereiche geeignet:

- Sohlneigung: 0.11 ÷ 16.2 ‰
- Korngrößen (d_k): 0.088 ÷ 28.7 mm
- Mittlere Fließgeschwindigkeit: 0.14 ÷ 2.88 m/s

3.7 Sedimenttransport nach Engelund-Hansen

Die Transportformel nach Engelund-Hansen basiert auf Energiebetrachtungen und berechnet hinreichend genaue Ergebnisse für sandige Flüsse mit beträchtlichem Schwebstofftransport. Die Formel wurde durch etwa 100 Versuche kalibriert und mit umfangreichen Felduntersuchungen verifiziert (Engelund & Hansen, 1967):

$$q_{b,k^*} = 0.05 \rho_w \frac{v^2}{\tau_0} \left[\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w) d_k} \right]^{5/2} \gamma_s \left[\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) g d_k^3 \right]^{1/2} \quad (45)$$

Die Transportformel ist für folgende Bereiche geeignet:

- Sohlneigung: 0.055 ÷ 19 ‰
- Korngrößen (d_k): 0.19 ÷ 0.93 mm
- Mittlere Fließgeschwindigkeit: 0.20 ÷ 1.90 m/s

3.8 Sedimenttransport nach Yang

Bei dieser Transportformel wird die Strömungsleistung für die Bestimmung der Sedimentkonzentration herangezogen. Die mittlere kritische Fließgeschwindigkeit bei Beginn der Sedimentbewegung errechnet sich aus (Yang, 1973):

$$\frac{v_c}{\omega_s} = \begin{cases} 0.66 + 2.5/\log\left(\frac{u_* d_k}{\nu}\right) - 0.06, & \frac{u_* d_k}{\nu} < 70 \\ 2.05, & \frac{u_* d_k}{\nu} \geq 70 \end{cases} \quad (46)$$

Die Transportformel nach Yang kann für sandige und kiesige Sedimente angewendet werden. Die Gültigkeit dieser Methode wird durch Daten aus Modellversuchen und Ergebnissen aus Feldversuchen in alluvialen Flüssen unter einer Vielzahl von Bedingungen gestützt und ist für folgende Bedingungen anwendbar:

- Sohlneigung: 0.043 ÷ 29 ‰
- Korngrößen (d_k): 0.062 ÷ 7 mm
- Mittlere Fließgeschwindigkeit: 0.24 ÷ 1.90 m/s

3.8.1 Transportformel nach Yang für Sand mit $d_k < 2$ mm

Die Gesamtsedimentkonzentration C_t in der Einheit *ppm* wird über folgende Beziehung ermittelt (Yang, 1973):

$$\log(C_t) = M + N \log\left(\frac{\nu S}{\omega_s} - \frac{v_c S}{\omega_s}\right) \quad (47)$$

Die Koeffizienten sind:

$$M = 5.435 - 0.286 \log\left(\frac{\omega_s d_k}{\nu}\right) - 0.457 \log\left(\frac{u_*}{\omega_s}\right) \quad (48a)$$

$$N = 1.799 - 0.409 \log\left(\frac{\omega_s d_k}{\nu}\right) - 0.314 \log\left(\frac{u_*}{\omega_s}\right) \quad (48b)$$

Für den Fall $C_t > 100$ ppm gilt folgende Formel mit den Koeffizienten nach Gl. (50a) und (50b) (Yang, 1979):

$$\log(C_t) = M + N \log\left(\frac{\nu S}{\omega_s}\right) \quad (49)$$

Die Koeffizienten sind:

$$M = 5.165 - 0.153 \log\left(\frac{\omega_s d_k}{\nu}\right) - 0.297 \log\left(\frac{u_*}{\omega_s}\right) \quad (50a)$$

$$N = 1.780 - 0.360 \log\left(\frac{\omega_s d_k}{\nu}\right) - 0.480 \log\left(\frac{u_*}{\omega_s}\right) \quad (50b)$$

3.8.2 Transportformel nach Yang für Kies mit $d_k \geq 2 \text{ mm}$

Die Gesamtsedimentkonzentration C_t für Kies wird mit derselben allgemeinen Transportformel wie für Sand nach Gl. (47) ermittelt, jedoch lauten hier die Koeffizienten (Yang, 1984):

$$M = 6.681 - 0.633 \log\left(\frac{\omega_s d_k}{\nu}\right) - 4.816 \log\left(\frac{u_*}{\omega_s}\right) \quad (51a)$$

$$N = 2.784 - 0.305 \log\left(\frac{\omega_s d_k}{\nu}\right) - 0.282 \log\left(\frac{u_*}{\omega_s}\right) \quad (51b)$$

3.9 Umrechnung zwischen Einheiten der Transportkapazität

Anschließend werden einige Formeln angeführt, um die Sedimenttransportkapazität in andere Einheiten umzurechnen:

- Von q_{b,k^*} [$N/m/s$] in $q_{b,k}$ [m^2/s]

$$q_{b,k} = \frac{q_{b,k^*}}{g \rho_s} \quad (52)$$

- Von C_t [ppm] in $q_{b,k}$ [m^2/s]

$$q_{b,k} = \frac{C_t Q_{channel}}{10^6 \frac{\rho_s}{\rho_w} b_{channel}} \quad (53)$$

- Von $q_{b,k}$ [m^2/s] in Q_s [kg/s]

$$Q_s = q_{b,k} \rho_s b_{channel} \quad (54)$$

Literaturverzeichnis

- DVWK. (1991). Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. *Merkblätter zur Wasserwirtschaft*, Heft 220.
- Engelund, F. & Hansen, E. (1967). *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Copenhagen, Denmark: Teknisk Verlag.
- Jirka, G. H. & Lang, C. (2009). *Einführung in die Gerinnehydraulik*. Universitätsverlag Karlsruhe: Karlsruhe.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *Rept 2nd Meeting Int. Assoc. Hydraul. Struct. Res.*, S. 39-64, Stockholm.
- Naudascher, E. (1992). *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*. Wien, New York: Springer-Verlag.
- Shields, A. (1936). Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, Heft 26. Berlin: Eigenverlag der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau.
- Van Rijn, L. C. (1984a). Sediment transport, Part I: Bed load transport. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), S. 1431-1456.
- Whipple, K. (2004). *Surface Processes and Landscape Evolution*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Wiberg, P. L. & Smith, J. D. (1989). Model for calculating bed load transport of sediment. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 115(1), S. 101-123.
- Wu, W. (2008). *Computational river dynamics*. London, UK: Taylor and Francis.
- Wu, W. & Wang, S. (2006). Formulas for sediment porosity and settling velocity. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 132(8), S. 858-862.

- Wu, W., Wang, S. & Jia, Y. (2000b). Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *IAHR Journal of Hydraulic Research*, 38(6), S. 427-434.
- Yang, C. T. (1973). Incipient motion and sediment transport. *ASCE Journal of Hydraulic Division*, 99(HY10), S. 1679-1704.
- Yang, C. T. (1979). Unit stream power equations for total load. *Journal of Hydrology*, 40, S. 123-138.
- Yang, C. T. (1984). Unit stream power equation for gravel. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12), S. 1783-1797.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dateneingabe und -ausgabe der hydraulischen Berechnung.....	2
Abbildung 2: Gegliedertes Flussquerprofil	3
Abbildung 3: Moody-Diagramm (Jirka & Lang, 2009).....	6
Abbildung 4: Energiekurve.....	14
Abbildung 5: Korngrößenverteilung	16
Abbildung 6: Dateneingabe und -ausgabe der sedimentologischen Berechnung	17
Abbildung 7: Definition der Scheiteldifferenz Δe	19
Abbildung 8: Sohlstabilität nach Shields (1936)	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strickler-Beiwert k_{st} für verschiedene Gerinnetypen (Naudascher, 1992)	8
Tabelle 2: Äquivalente Sandrauigkeiten k_s diverser Gerinnetypen (DVWK, 1991).....	9
Tabelle 3: Zustände in Fließgewässern	14
Tabelle 4: Exemplarische Berechnung von Hiding-Exposure-Faktoren für zwei Korngrößen d_4 und d_7	20
Tabelle 5: Bereiche der Rouse-Zahl (Whipple, 2004)	22

Teil C

Benutzerhandbuch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Der Einstieg in das Programm	2
2.1	Download und Installation.....	2
2.2	Source-Code.....	2
2.3	Überblick auf die Programmfähigkeiten.....	3
2.3.1	Grafische Benutzeroberfläche	3
2.3.2	Funktionen des Moduls PRAXIS	4
2.4	Navigation im Modul PRAXIS.....	5
2.5	Speichern, Öffnen und Schließen von Projekten.....	6
3	Schritte einer Berechnung	7
3.1	Ein neues Projekt anlegen	7
3.2	Eingabe der Projektbeschreibung.....	8
3.3	Wahl der Sedimenttransportformeln.....	8
3.4	Eingabe der Geometrie.....	9
3.5	Eingabe der hydraulischen Eingangsgrößen.....	11
3.6	Eingabe der sedimentologischen Eingangsgrößen.....	12
3.7	Starten des Berechnungsvorganges	14
4	Ergebnisse	15
4.1	Tabellen	16
4.1.1	Hydraulische Ergebnisse - Ergebnistabelle	17
4.1.2	Sedimentologische Ergebnisse - Ergebnistabelle	17
4.2	Grafiken	18
4.2.1	Hydraulische Ergebnisse - Flussquerprofil	20
4.2.2	Hydraulische Ergebnisse - Pegelschlüssel	20
4.2.3	Sedimentologische Ergebnisse - Korngrößenverteilung.....	20
4.2.4	Sedimentologische Ergebnisse - Sedimentkapazität	21
	Abbildungsverzeichnis	22

1 Einleitung

Der Bed Load Analyzer ist ein Programm zur Berechnung von hydraulischen und sedimentologischen Kennwerten in gegliederten Flussquerprofilen. Das Programm besteht aus einer grafischen Benutzeroberfläche zur interaktiven Bedienführung. Es ist in die Module PRAXIS und LEHRE gegliedert, wobei man im Modul PRAXIS, in dem die hydraulische und sedimentologische Berechnung durchgeführt werden kann, die Möglichkeiten der

- Datenspeicherung,
- Navigation zwischen voneinander unabhängigen Projekten,
- Ergebnisdarstellung in grafischer und tabellarischer Form und der
- Ausgabe der Ergebnisse in ein druckbares protokollartiges Format

hat. Das Modul LEHRE befasst sich mit verschiedenen Themen des Wasserbaus und deren Berechnungsansätze und dient in Zukunft als Informationsplattform für Studierende und Lehrende.

In diesem Manual wird der Einstieg in den Bed Load Analyzer und das Arbeiten bzw. das Durchführen von Berechnungen mit dem Modul PRAXIS beschrieben. In Kapitel 2 erhält man Informationen über den Download und die Installation des Bed Load Analyzers, einen Überblick auf die Programmfähigkeiten und eine Beschreibung, wie man im Bed Load Analyzer navigiert und mit Projekten arbeitet.

Die erforderlichen Schritte zur Durchführung einer Berechnung im Modul PRAXIS, vom Anlegen eines neuen Projekts bis zum Starten des Berechnungsvorganges, werden in Kapitel 3 beschrieben.

Schließlich wird in Kapitel 4 erläutert, wie die gewonnenen Ergebnisse dargestellt und betrachtet werden können.

2 Der Einstieg in das Programm

Der Bed Load Analyzer wurde im Betriebssystem Windows mit der Programmiersprache Python 2.7¹ entwickelt. Die grafische Benutzeroberfläche wurde mit dem GUI-Framework Qt 4.8.4 und der zugehörigen Python-Anbindung PyQt 4.9.5² erstellt. Für die grafische Darstellung der Ergebnisse wurde die Python-Bibliothek Matplotlib 1.2.0³ verwendet.

2.1 Download und Installation

Es stehen vorkompilierte ausführbare Anwendungen in komprimierten Ordnern für Windows als 32-Bit- und 64-Bit-Versionen auf der Homepage des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz⁴ unter dem Menüpunkt **Software** sowie auf der Homepage des Kooperationsprojekts SUSTAINICUM⁵ zum Download zur Verfügung. Nach dem Download und dem Entpacken kann der Programmordner in ein beliebiges Verzeichnis verschoben und das Programm über die Datei Bed Load Analyzer 2.0.exe, die sich im Programmordner befindet, ausgeführt werden. Eine Installation ist somit nicht erforderlich. Anstatt einer Deinstallation kann der Programmordner einfach gelöscht werden.

2.2 Source-Code

Eine weitere Möglichkeit ist, den Quellcode herunterzuladen und zu kompilieren. Dies hat den Vorteil, das Programm auf windowsfremden Betriebssystemen wie Linux ausführen zu können. Jedoch ist zusätzlich die Installation der oben genannten Bibliotheken und Module erforderlich. Mit dieser Methode erreicht man außerdem eine höhere Flexibilität, da man die Berechnungsalgorithmen für die hydraulische Berechnung oder z. B. die Transportformeln nach seinen eigenen Anforderungen anpassen kann.

¹ <http://www.python.org>

² <http://www.riverbankcomputing.co.uk>

³ <http://www.matplotlib.org>

⁴ <http://www.hydro.tugraz.at>

⁵ <http://www.sustainicum.at>

2.3 Überblick auf die Programmfähigkeiten

2.3.1 Grafische Benutzeroberfläche

Das Programm ist mit einer grafischen Benutzeroberfläche versehen und dient zur interaktiven Eingabe der erforderlichen Eingangsparameter für die Berechnung sowie zur grafischen und tabellarischen Darstellung der Berechnungsergebnisse. Die grafische Benutzeroberfläche ist mit Quickinfos, Menüs, Werkzeugleisten, einer Statusleiste und einem Navigator aufgebaut und ermöglicht dadurch eine intuitive Bedienführung, ohne sich mit viel Zeitaufwand in den Bed Load Analyzer einarbeiten zu müssen. Abbildung 1 zeigt das Startfenster des Bed Load Analyzers. Unter dem Menü **Modul** kann zwischen den Modulen PRAXIS und LEHRE gewählt werden.

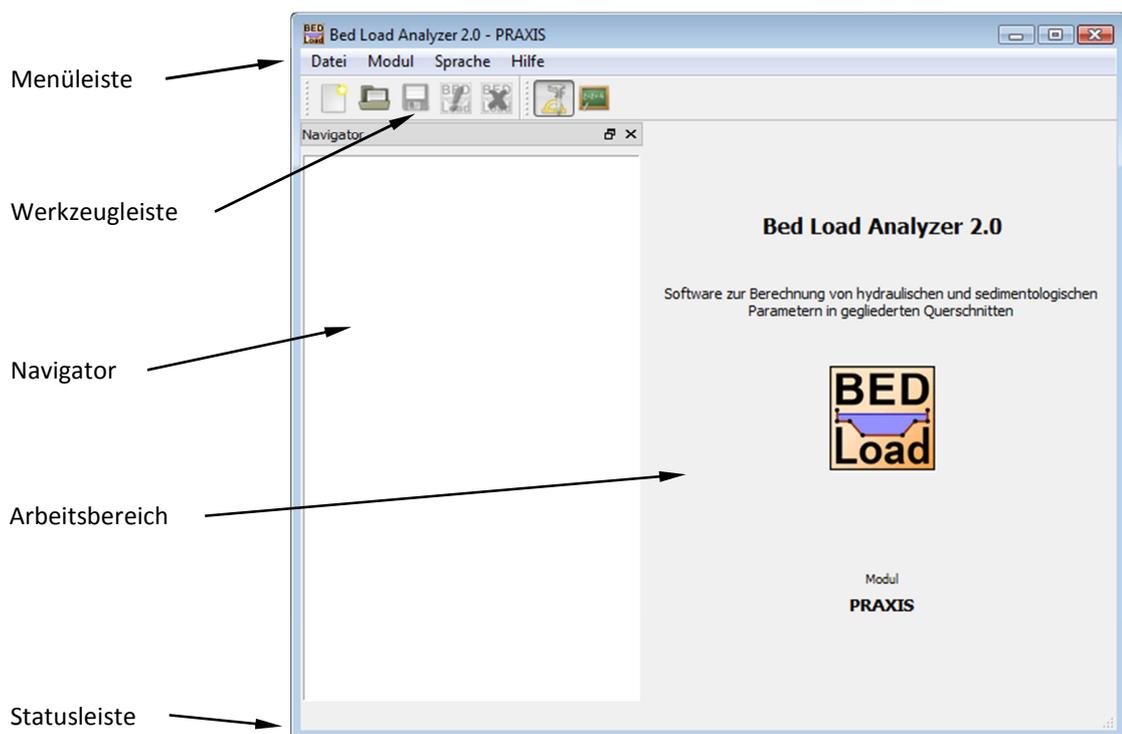


Abbildung 1: Hauptfenster

Standardmäßig wird der Bed Load Analyzer in der Sprache Deutsch gestartet. Unter dem Menü **Sprache** kann zwischen Deutsch und Englisch gewählt werden.

2.3.2 Funktionen des Moduls PRAXIS

Mit dem Modul PRAXIS können hydrodynamische und sedimentologische Berechnungen eines Flussquerprofils durchgeführt werden. Die hydraulische Berechnung erfolgt über stationär-gleichförmigen Abfluss. Dabei ist zusätzlich zum Abfluss entweder der Wasserspiegel oder das Reibungsgefälle anzugeben. Die sedimentologische Berechnung greift auf verschiedene Transportformeln zurück, um zusätzlich zu allgemeinen sedimentologischen Kennwerten die Geschiebemenge des Hauptgerinnes zu ermitteln. Die grundsätzlichen Funktionen des Moduls PRAXIS zur Durchführung einer hydraulischen Berechnung sind:

- Eingabe der Projektbeschreibung
- Definition der Geometrie eines Flussquerprofils in der Software oder Einlesen von Koordinaten aus ASCII-Datei
- Schreiben der eingegebenen Koordinaten in ASCII-Datei
- Definition von Randbedingungen für mehrere Lastfälle
- Eingabe von hydraulischen Eingangsparametern unterschiedlicher Randbedingungen (Wasserspiegel oder Reibungsgefälle bekannt)
- Wahl zwischen verschiedenen Rauigkeitsansätzen (Strickler, Chezy, Manning und Nikuradse)
- Eingabe der Rauigkeiten für linkes Vorland LVL, Hauptgerinne HG und rechtes Vorland RVL
- Berechnung hydraulischer Kennwerte für die drei Rauigkeitsbereiche

Soll zusätzlich zur hydraulischen Berechnung eine sedimentologische Berechnung durchgeführt werden, so kommen folgende Funktionen hinzu:

- Wahl zwischen verschiedenen Sedimenttransportformeln (drei Geschiebetransportformeln und zwei Gesamtfeststofftransportformeln) mit Beschreibung des jeweiligen Anwendungsbereichs
- Korrektur der Kornrauigkeit
- Wahl zwischen Berechnung für eine Korngröße oder für gesamte Korngrößenverteilung

- Berücksichtigung des „Hiding-Exposure“-Effekts (bei Geschiebetransportformeln)
- Berechnung sedimentologischer Kennwerte des Hauptgerinnes

Nach erfolgreich durchgeführter Berechnung stehen folgende Funktionen zur Einsicht der Ergebnisse zur Verfügung:

- Tabellarische Darstellung der Ergebnisse
- Grafische Darstellung der Ergebnisse
- Möglichkeit zur Kopie von Tabelleneinträgen in die Zwischenablage
- Speichermöglichkeit von Grafiken in verschiedene Bildformate
- Drucken von tabellarischen Ergebnissen als Protokoll

Weiters beinhaltet das Modul PRAXIS Funktionen, um Projekte jederzeit zu speichern, öffnen oder zu schließen sowie einen Navigator, um zwischen den Formularblättern und zwischen verschiedenen Projekten hin- und herzuwechseln.

2.4 Navigation im Modul PRAXIS

Im Modul PRAXIS ist es möglich, mit mehreren Projekten parallel zu arbeiten. Dabei besteht ein Projekt aus einer Beschreibung, der Gesamtheit aller erforderlichen Eingaben zur Durchführung einer Berechnung sowie die daraus gewonnenen Ergebnisse. Der Arbeitsbereich besteht aus Eingabemasken, deren Titel im Navigator aufgelistet sind. Die Navigation zwischen den Eingabemasken erfolgt einerseits durch Betätigen der Pfeiltasten am unteren Rand des Arbeitsbereiches, andererseits gelangt man durch Anklicken eines Titels des aktiven Projektes im Navigator direkt zur gewählten Eingabemaske. Dabei ist das aktive Projekt das gerade bearbeitete und das im Navigator visuell hervorgehobene. Abbildung 2 zeigt den Bed Load Analyzer mit vier geöffneten Projekten, wobei das erste Projekt aktiv ist und die Eingabemaske Geometrie geöffnet ist.

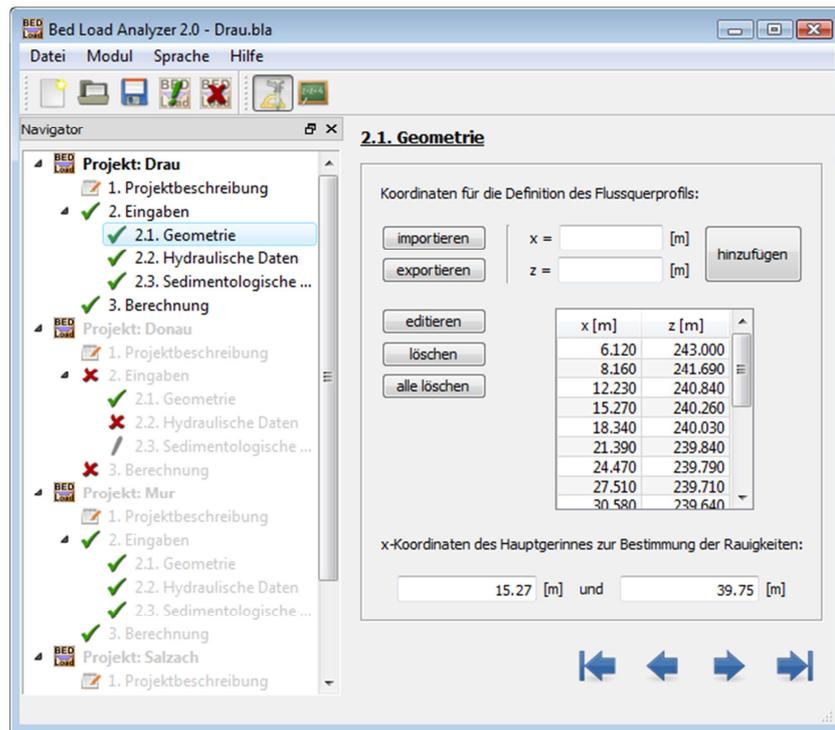


Abbildung 2: Arbeiten mit dem Modul PRAXIS

Bei den Eingabemasken, die im Navigator mit einem roten Kreuz markiert sind, handelt es sich um Pflichteingaben, d. h. dass diese Eingabemasken vollständig ausgefüllt werden müssen, um eine Berechnung durchführen zu können. Sind die Eingaben einer Eingabemaske vollständig, ändert sich das rote Kreuz zu einem grünen Haken.

Da die Eingabemasken größtenteils unabhängig voneinander sind, ist es möglich, diese in einer beliebigen Reihenfolge auszufüllen. Um den Überblick zu bewahren, wird jedoch empfohlen, die Eingabemasken nacheinander, also in der Reihenfolge, wie sie im Navigator aufgelistet sind, zu bearbeiten.

2.5 Speichern, Öffnen und Schließen von Projekten

Ein Projekt kann in jedem beliebigen Bearbeitungsstand unter dem Menüpunkt **Datei | Speichern** gespeichert werden. Nach Angabe eines Dateinamens und eines Speicherpfades und anschließender Bestätigung des Dialogfensters wird eine Datei mit der Endung *.bla (Bed Load Analyzer-Datei) im gewählten Verzeichnis angelegt. Diese Datei kann unter **Datei | Öffnen** jederzeit geöffnet und weiterbearbeitet werden. Das Schließen eines Projektes erfolgt mit dem Menüpunkt **Datei | Schließen**.

3 Schritte einer Berechnung

In diesem Kapitel wird die Durchführung einer Berechnung im Modul PRAXIS erläutert.

Eine Berechnung ist dabei in folgende Schritte gegliedert:

- Neues Projekt anlegen
- Projektbeschreibung eingeben
- Sedimenttransportformel(n) auswählen
- Eingabe der Geometrie
- Eingabe der hydraulischen Eingangsgrößen
- Eingabe der sedimentologischen Eingangsgrößen
- Durchführung der Berechnung
- Betrachten der Ergebnisse

3.1 Ein neues Projekt anlegen

Ein neues Projekt kann unter dem Menüpunkt **Datei | Neu** angelegt werden. Es folgt ein Eingabedialog, in dem der Name des neuen Projektes eingegeben werden kann (Abbildung 3). Der Projektname kann auch später ergänzt oder geändert werden. Durch Bestätigen des Eingabedialoges erscheint im Navigator ein Projekt und es kann mit der Bearbeitung des Projektes begonnen werden.

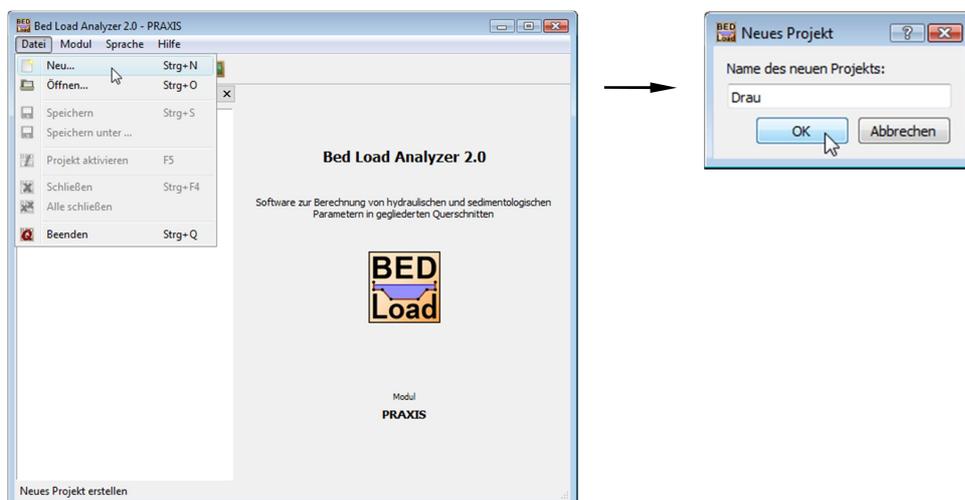


Abbildung 3: Neues Projekt anlegen

3.2 Eingabe der Projektbeschreibung

Nachdem ein neues Projekt angelegt wurde, erscheint die Eingabemaske **Projektbeschreibung**, in dem informelle Angaben und Bemerkungen zum Projekt eingegeben werden können (Abbildung 4). Die Eingabe der Projektbeschreibung ist nicht zwingend erforderlich. Jedoch wird eine genaue Beschreibung des Projektes empfohlen, um es eindeutig und unverwechselbar zu machen.

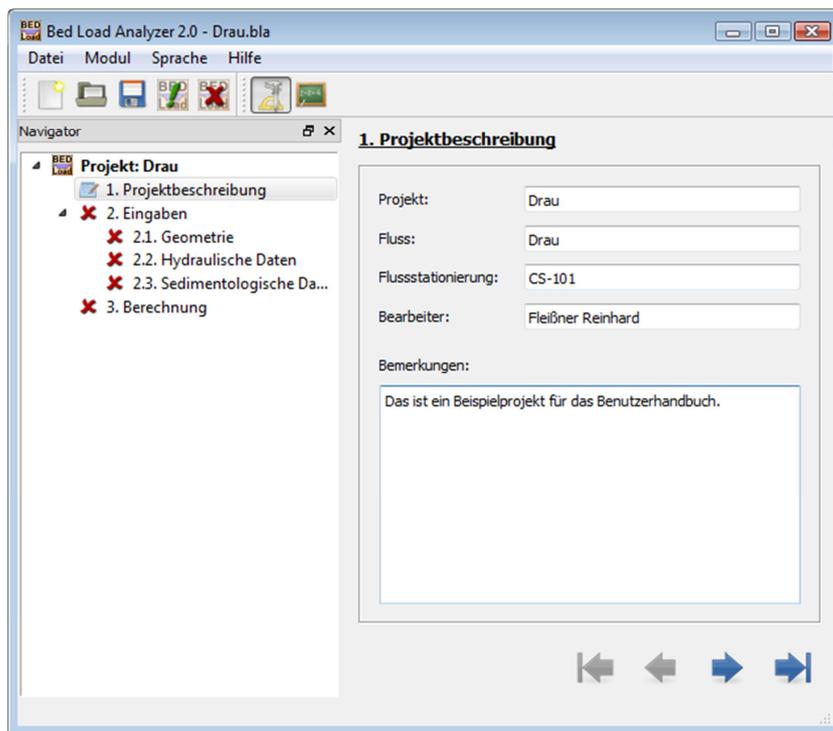


Abbildung 4: Eingabemaske Projektbeschreibung

3.3 Wahl der Sedimenttransportformeln

In der Eingabemaske **Eingaben** (Abbildung 5) erhält man einen Überblick auf die erforderlichen Eingaben. Soll neben der hydraulischen Berechnung auch eine sedimentologische Berechnung durchgeführt werden, so ist mindestens ein Ansatz zur Berechnung des Sedimenttransports zu wählen. Es stehen drei Geschiebetransportformeln und zwei Gesamtfeststofftransportformeln, welche auch den Schwebstoffanteil berücksichtigen, zur Auswahl. Die Auswahlkästchen sind mit Quickinfos hinterlegt, welche die jeweilige Transportformel beschreiben und Anwendungsbereiche angeben.

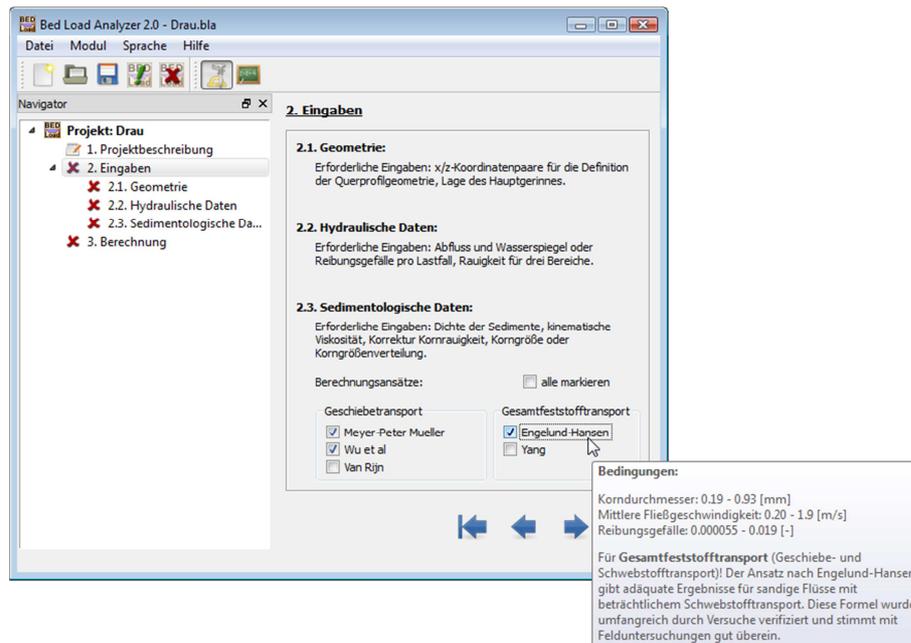


Abbildung 5: Eingabemaske Eingaben

3.4 Eingabe der Geometrie

Die Geometrie des Flussquerprofils wird in der Eingabemaske **Geometrie** definiert (Abbildung 6).

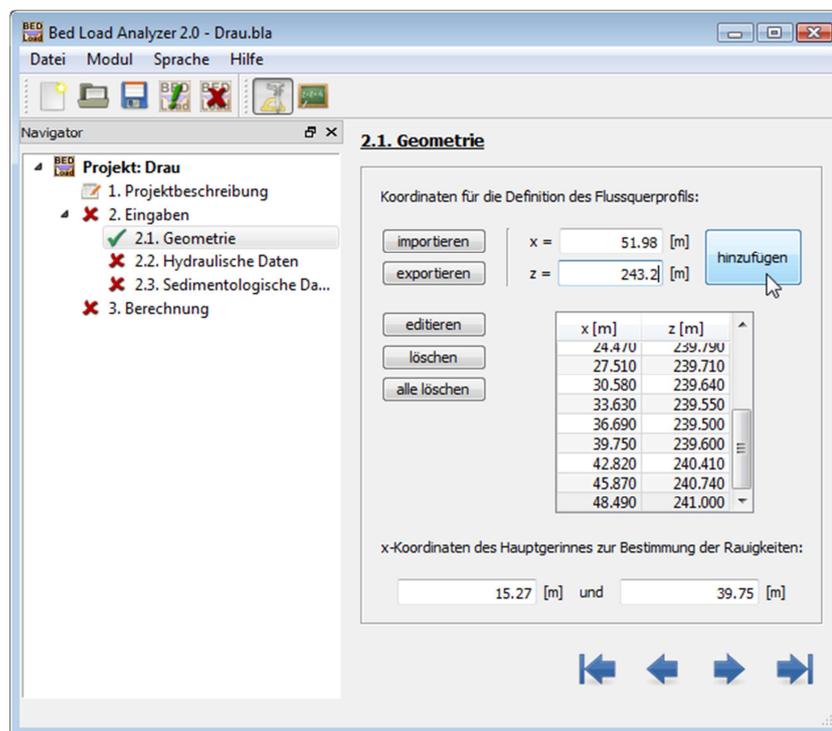
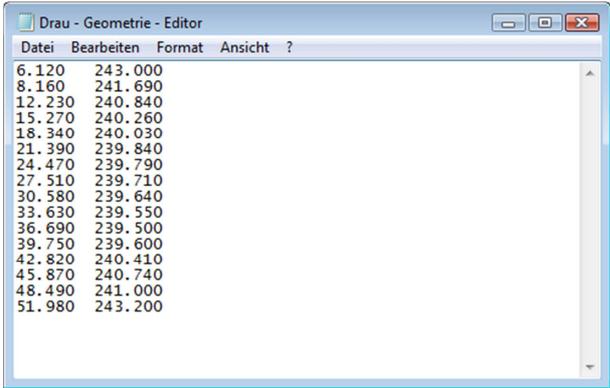


Abbildung 6: Eingabemaske Geometrie

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Geometrie zu definieren:

- Manuelle Eingabe von Koordinaten
- Einlesen von Koordinaten aus ASCII-Datei

Durch die manuelle Eingabe von Koordinaten (x/z-Wertepaare) in die entsprechenden Eingabefelder und Drücken der Schaltfläche **hinzufügen** wird ein Profilpunkt definiert. Sollen Koordinaten aus einer ASCII-Datei eingelesen werden, gelangt man über die Schaltfläche **importieren** in ein Dialogfenster, in dem man die gewünschte ASCII-Datei auswählen kann. Beim Einlesen werden alle bisherigen Profilpunkteinträge unwiderruflich überschrieben. In der ASCII-Datei können die x- und die z-Koordinaten durch einen Tabulator oder durch ein Leerzeichen getrennt und die Koordinatenpaare untereinander aufgelistet sein. Abbildung 7 zeigt den Inhalt der ASCII-Datei für die Geometrie des hier behandelten Beispielprojekts.



The screenshot shows a window titled 'Drau - Geometrie - Editor' with a menu bar containing 'Datei', 'Bearbeiten', 'Format', 'Ansicht', and '?'. The main area displays a list of coordinate pairs, each on a new line, separated by a tab character. The coordinates are: 6.120 243.000, 8.160 241.690, 12.230 240.840, 15.270 240.260, 18.340 240.030, 21.390 239.840, 24.470 239.790, 27.510 239.710, 30.580 239.640, 33.630 239.550, 36.690 239.500, 39.750 239.600, 42.820 240.410, 45.870 240.740, 48.490 241.000, and 51.980 243.200.

6.120	243.000
8.160	241.690
12.230	240.840
15.270	240.260
18.340	240.030
21.390	239.840
24.470	239.790
27.510	239.710
30.580	239.640
33.630	239.550
36.690	239.500
39.750	239.600
42.820	240.410
45.870	240.740
48.490	241.000
51.980	243.200

Abbildung 7: ASCII-Datei mit Koordinatenpaaren

Profilpunkteinträge können über die Schaltfläche **exportieren** in eine ASCII-Datei geschrieben werden. Die Formatierung erfolgt dabei analog zu Abbildung 7.

Es sind mindestens zwei Profilpunkte erforderlich, um eine gültige Geometrie zu erzeugen. Durch Markieren eines Koordinatenpaares und Drücken der Schaltfläche **editieren** oder durch Doppelklick auf ein Koordinatenpaar wird dieses aus der Liste genommen und dessen Werte in die Eingabefelder geschrieben, wodurch die Koordinaten geändert werden können. Weiters ist es möglich, einzelne oder alle Profilpunkte über die entsprechenden Schaltflächen zu löschen.

In welcher Reihenfolge die Koordinaten eingegeben werden bzw. in welcher Reihenfolge die Koordinaten in der ASCII-Datei abgelegt sind, spielt keine Rolle. Beim Hinzufügen eines Profilpunktes wird ein Sortieralgorithmus durchlaufen, der die Position zwischen den bereits definierten Profilpunkten ermittelt. Durch diese Sortierung der Profilpunkte wird immer ein gültiges Flussquerprofil erstellt. Folgende Probleme können dadurch ausgeschlossen werden:

- Überhängende Profile
- In sich geschnittene Profile
- Vertikale Flanken bestehend aus mehr als zwei Profilpunkten

Nach der Eingabe des Flussquerprofils sind zwei x-Koordinaten anzugeben, welche den Bereich des Hauptgerinnes definieren. Dieser Bereich stellt den mittleren der drei Rauigkeitsbereichen dar. Außerdem bezieht sich die sedimentologische Berechnung auf diesen Bereich. Für diese Werte können x-Koordinaten von Profilpunkten übernommen werden. Ist eine eingegebene x-Koordinate nicht Bestandteil der bereits definierten Geometrie, kann mit dieser x-Koordinate ein Profilpunkt zwischen zwei bestehenden Profilpunkten linear interpoliert werden. Abbildung 8 zeigt das zugehörige Dialogfenster. Dieser interpolierte Profilpunkt wird dann in die Geometrie aufgenommen.



Abbildung 8: Interpolation eines Profilpunktes

3.5 Eingabe der hydraulischen Eingangsgrößen

In der Eingabemaske **Hydraulische Daten** (Abbildung 9) werden die hydraulischen Eingangsgrößen definiert. Es können beliebig viele Lastfälle über die Schaltfläche **hinzufügen** definiert werden. Es empfiehlt sich, jeden Lastfall mit einer eindeutigen Bezeichnung zu versehen. Ein Lastfall beinhaltet die hydraulischen Randbedingungen. Die erste Randbedingung ist der Abfluss. Je nach Problemstellung kann als zweite Randbedin-

gung entweder der Wasserspiegel oder das Reibungsgefälle eingegeben werden. Nachdem ein Lastfall markiert wurde, kann man diesen in der Liste mit den entsprechenden Schaltflächen beliebig nach oben oder nach unten verschieben.

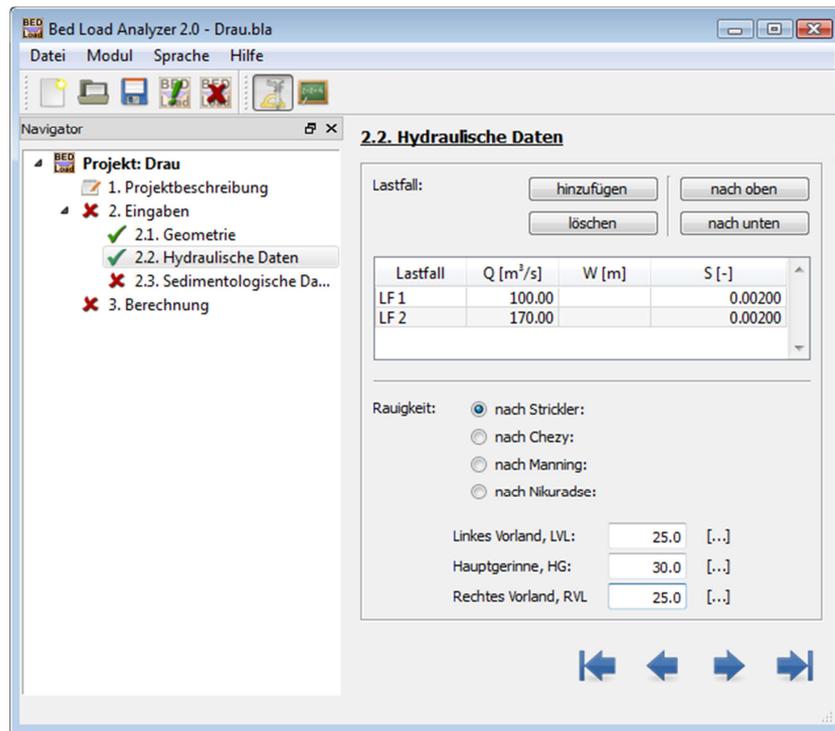


Abbildung 9: Eingabemaske Hydraulische Daten

Zur Eingabe der Rauigkeit stehen vier verschiedene Ansätze (Strickler, Chezy, Manning und Nikuradse) zur Verfügung. Hat man den gewünschten Rauigkeitsansatz ausgewählt, können die Rauigkeitswerte für die drei Bereiche (linkes Vorland, Hauptgerinne und rechtes Vorland) eingegeben werden.

3.6 Eingabe der sedimentologischen Eingangsgrößen

Hat man mindestens eine Transportformel in der Eingabemaske Eingaben ausgewählt, können in der Eingabemaske **Sedimentologische Daten** alle erforderlichen Daten für die Geschiebetransportberechnung eingegeben werden (Abbildung 10). Werte für die Dichte der Sedimente sowie für die kinematische Viskosität des Wassers sind vorgegeben, können jedoch nach Erfordernis geändert werden. Weiters kann ausgewählt werden, ob die Korrektur der Kornrauigkeit berücksichtigt werden soll. Bei der Angabe der Sedimentkorngröße kann zwischen einer Berechnung für eine Korngröße und einer

Berechnung für eine Korngrößenverteilung unterschieden werden. Bei der Berechnung für eine Korngröße bezieht sich die sedimentologische Berechnung auf den einen eingegebenen Korndurchmesser. Wählt man die Berechnung für eine Korngrößenverteilung, muss die Sieblinie eingegeben werden. Dazu sind die Korndurchmesser für Sand und Kies vorgegeben. Jedoch können Korndurchmesser auch hinzugefügt oder gelöscht werden, um die Sieblinie an individuelle Bedingungen anpassen zu können. Zusätzlich zu den Durchmesserangaben sind mindestens zwei Einträge für den Siebdurchgang erforderlich, um eine gültige Sieblinie zu erstellen.

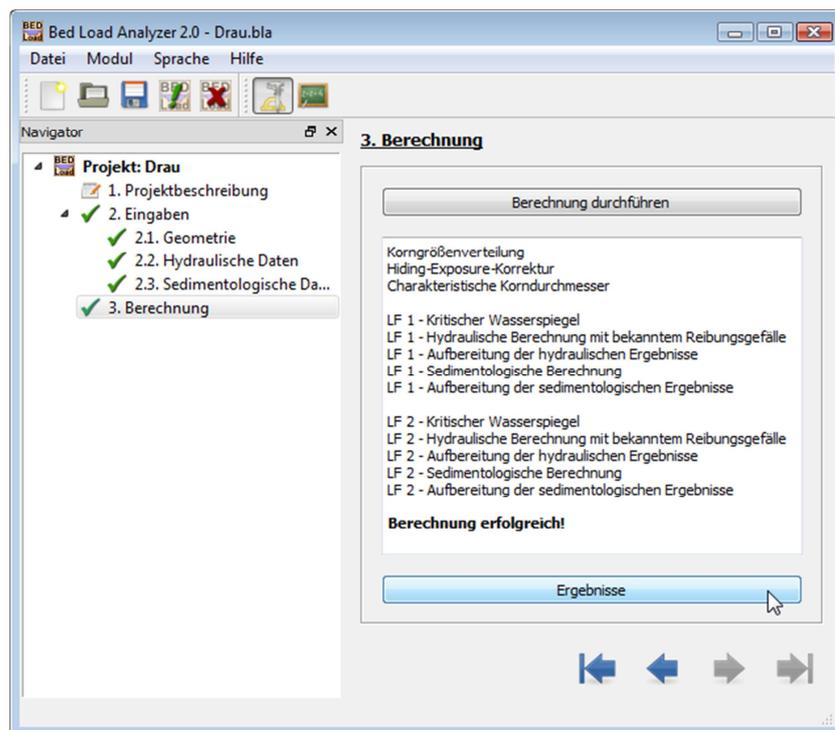


Abbildung 10: Eingabemaske Sedimentologische Daten

Ähnlich wie bei der Eingabe der Geometrie (Abschnitt 3.4) hat man auch hier die Möglichkeit, die Werte der Sieblinie in eine ASCII-Datei zu schreiben bzw. die Korngrößenverteilung aus einer ASCII-Datei einzulesen. Der Durchmesserwert ist dabei durch einen Tabulator oder durch ein Leerzeichen vom Wert des Siebdurchgangs getrennt, die Wertepaare sind zeilenweise in der Datei abgelegt.

3.7 Starten des Berechnungsvorganges

Nach vollständiger Eingabe aller erforderlichen Parameter kann der Rechengvorgang in der Eingabemaske **Berechnung** (Abbildung 11) durchgeführt werden. Im Statusfenster werden Meldungen über erfolgreich oder nicht erfolgreich durchgeführte Rechenschritte angezeigt. Nach durchgeführter Berechnung können über die Schaltfläche **Ergebnisse** die berechneten Ergebnisse betrachtet werden.

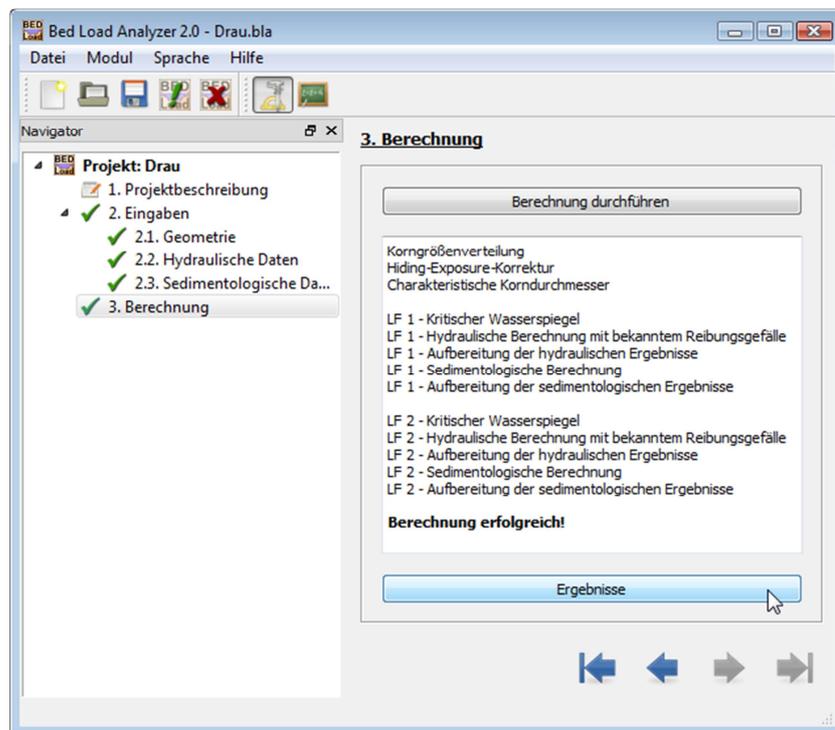


Abbildung 11: Eingabemaske Berechnung

4 Ergebnisse

Zur Betrachtung der Ergebnisse wird ein eigenes Fenster geöffnet (Abbildung 12). Es besteht aus einem Navigator, einem Splitter, einer Auswahl des darzustellenden Lastfalls, einer Werkzeugleiste für die Darstellungsmöglichkeiten der Unterfenster und einem Arbeitsbereich, in dem die Ergebnisfenster geöffnet werden. Die Breite des Navigators kann mittels einem Splitter zwischen Navigator und Arbeitsbereich geändert werden, bzw. kann man den Navigator damit ausblenden.

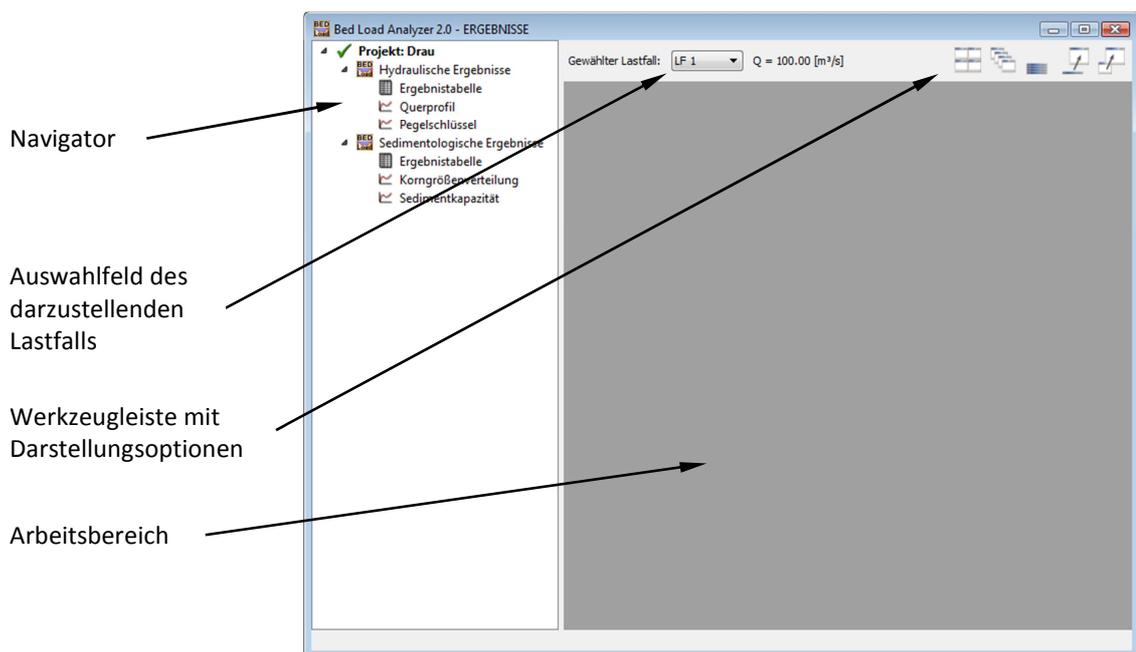


Abbildung 12: Ergebnishauptfenster

Im Navigator sind die verfügbaren Ergebnisse der geöffneten Projekte dargestellt. Ein grüner Haken signalisiert, dass die Ergebnisse aktuell sind. Wird jedoch ein rotes Kreuz angezeigt, beziehen sich die Ergebnisse auf den zuletzt erfolgreich durchgeführten Berechnungsvorgang. Die Eingaben sind seit dem letzten Berechnungsvorgang geändert worden, es muss also die Berechnung erneut durchgeführt werden, um aktuelle Ergebnisse zu erhalten.

Durch einen Doppelklick auf einen Eintrag im Navigator wird das jeweilige Ergebnisfenster im Arbeitsbereich geöffnet. Es können bis zu sechs Ergebnisfenster geöffnet

werden. In der Werkzeugleiste stehen Möglichkeiten zur Verfügung, wie die Ergebnisfenster im Arbeitsbereich dargestellt werden sollen.

Mit dem Auswahlwechsler kann ein Lastfall gewählt werden, für welchen die Ergebnisse in den Ergebnisfenstern gezeigt werden sollen. Bei den Ergebnisfenstern unterscheidet man solche mit Tabellen und solche mit Grafiken. In Abbildung 13 sind alle Unterfenster geöffnet und stufenförmig angeordnet.

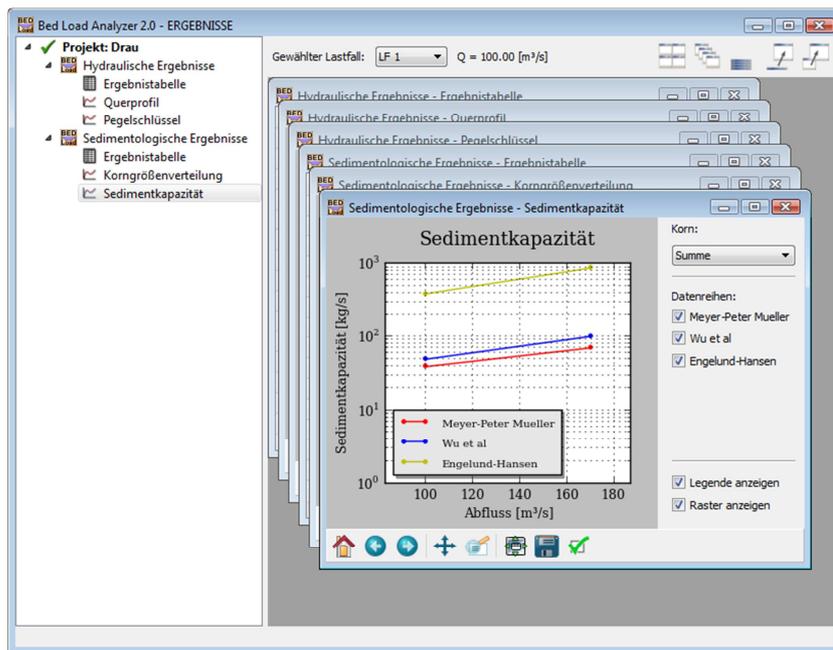


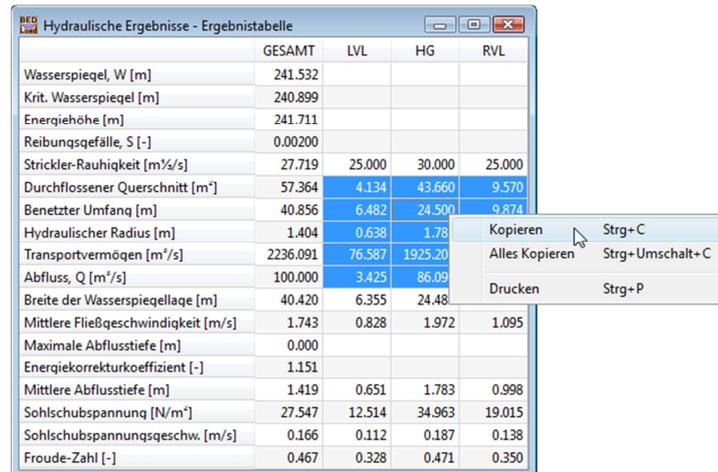
Abbildung 13: Ergebnishauptfenster mit geöffneten Unterfenstern

4.1 Tabellen

Ergebnisfenster, deren Inhalt eine Tabelle ist, sind im Navigator mit einem Tabellen-Symbol versehen. Es werden die hydraulischen sowie die sedimentologischen Ergebnisse in Tabellen dargestellt. Markiert man eine oder mehrere Zellen einer Tabelle und drückt man die rechte Maustaste, öffnet sich ein Kontextmenü (Abbildung 14). Durch den Menüpunkt **Kopieren** werden die Einträge der markierten Zellen in die Zwischenablage kopiert. Mit **Alles Kopieren** werden die Inhalte aller Zellen sowie alle Zeilen- und Spaltenüberschriften in die Zwischenablage kopiert. Wählt man den Menüpunkt **Drucken**, wird ein Protokoll mit den Ergebnissen erstellt, welches an einen Drucker gesendet werden kann.

4.1.1 Hydraulische Ergebnisse - Ergebnistabelle

Die Ergebnistabelle der hydraulischen Berechnung (Abbildung 14) beinhaltet hydraulische Kennwerte des gewählten Lastfalls. Die erste Spalte beinhaltet Ergebnisse, die sich auf das gesamte Flussquerprofil beziehen. In den restlichen Spalten sind Ergebnisse der drei Rauigkeitsbereiche (linkes Vorland LVL, Hauptgerinne HG und rechtes Vorland RVL) enthalten.



	GESAMT	LVL	HG	RVL
Wasserspiegel, W [m]	241.532			
Krit. Wasserspiegel [m]	240.899			
Energiehöhe [m]	241.711			
Reibungsgefälle, S [-]	0.00200			
Strickler-Rauhigkeit [m ^{1/2} /s]	27.719	25.000	30.000	25.000
Durchflossener Querschnitt [m ²]	57.364	4.134	43.660	9.570
Benetzter Umfang [m]	40.856	6.482	24.500	9.874
Hydraulischer Radius [m]	1.404	0.638	1.78	
Transportvermögen [m ³ /s]	2236.091	76.587	1925.20	
Abfluss, Q [m ³ /s]	100.000	3.425	86.09	
Breite der Wasserspiegellage [m]	40.420	6.355	24.48	
Mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]	1.743	0.828	1.972	1.095
Maximale Abflusstiefe [m]	0.000			
Energiekorrekturkoeffizient [-]	1.151			
Mittlere Abflusstiefe [m]	1.419	0.651	1.783	0.998
Sohlschubspannung [N/m ²]	27.547	12.514	34.963	19.015
Sohlschubspannungsgeschw. [m/s]	0.166	0.112	0.187	0.138
Froude-Zahl [-]	0.467	0.328	0.471	0.350

Abbildung 14: Ergebnistabelle der hydraulischen Berechnung

4.1.2 Sedimentologische Ergebnisse - Ergebnistabelle

In dieser Tabelle sind die sedimentologischen Ergebnisse des gewählten Lastfalls dargestellt (Abbildung 15). Die ersten acht Zeilen beinhalten allgemeine Ergebnisse, die unabhängig von der gewählten Transportformel aber abhängig vom Korndurchmesser berechnet werden. In allen darauf folgenden Zeilen sind Ergebnisse der anfangs der Berechnung gewählten Transportformeln dargestellt. Welche Ergebnisse zu welcher Transportformel gehören, wird durch die Abkürzung der Transportformel in der Zeilenüberschrift gekennzeichnet. Die ersten Spalten zeigen Ergebnisse von charakteristischen Durchmessern der Korngrößenverteilung (d_m , d_{50} , d_{10} , d_{90}). Die Sedimentkapazität in diesen Spalten bezieht sich auf eine Kornfraktion von 100 Prozent. Die weiteren Spalten sind die Ergebnisse der Kornfraktionen aus der Korngrößenverteilung, die Sedimentkapazität bezieht sich hierbei auf die Fraktion des jeweiligen Korndurchmessers.

Die Summe der Sedimentkapazitäten der einzelnen Korngrößen ist in einer eigenen vorangestellten Spalte dargestellt.

	dm	d50	d10	d90	Sum	d99	d97	d90	d70	d42	d27	d18	d11	d6	d2	d0
Korndurchmesser [mm]	5.564	5.143	0.450	16.000		64.000	32.000	16.000	8.000	4.000	2.000	1.000	0.500	0.250	0.125	0.063
Siebdurchgang [%]	0.0	50.0	10.0	90.0		99.0	97.0	90.0	70.0	42.0	27.0	18.0	11.0	6.0	2.0	0.0
Fraktion [%]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	1.0	2.0	7.0	20.0	28.0	15.0	9.0	7.0	5.0	4.0	2.0
Hiding-Faktor [-]	0.500	0.500	0.500	0.500		0.071	0.124	0.204	0.311	0.437	0.565	0.681	0.777	0.851	0.905	0.943
Exposure-Faktor [-]	0.500	0.500	0.500	0.500		0.929	0.876	0.796	0.689	0.563	0.435	0.319	0.223	0.149	0.095	0.057
Partikel-Reynolds-Zahl [-]	800.260	739.740	64.725	2301.349		9205.398	4602.699	2301.349	1150.675	575.337	287.669	143.834	71.917	35.959	17.979	9.062
Sinkgeschwindigkeit [m/s]	0.337	0.322	0.052	0.587		1.184	0.835	0.587	0.409	0.280	0.185	0.113	0.059	0.024	0.007	0.002
Rouse-Zahl [-]	4.501	4.311	0.701	7.843		15.833	11.163	7.843	5.468	3.749	2.479	1.516	0.790	0.315	0.096	0.026
MPM - Krit. Shields-Parameter [-]	0.047	0.047	0.047	0.047		0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
MPM - Shields-Parameter [-]	0.195	0.207	1.284	0.088		0.031	0.052	0.088	0.148	0.249	0.420	0.706	1.187	1.996	3.357	5.612
MPM - Krit. Schubspannung [N/m²]	4.233	3.913	0.342	12.172		10.420	7.546	5.383	3.779	2.612	1.780	1.199	0.803	0.540	0.368	0.257
MPM - Kornschubspannung [N/m²]	17.542	17.201	9.355	22.844		32.307	27.167	22.844	19.210	16.153	13.583	11.422	9.605	8.077	6.792	5.722
MPM - Sedimentkapazität [kg/s]	45.22	45.55	34.46	28.46	39.14	0.00	0.07	1.99	8.46	12.90	6.65	3.61	2.47	1.52	1.04	0.44
WU - Krit. Shields-Parameter [-]	0.030	0.030	0.030	0.030		0.030	0.030	0.030					0.030	0.030	0.030	0.030
WU - Shields-Parameter [-]	0.195	0.207	1.284	0.088		0.031	0.052	0.088					1.187	1.996	3.357	5.612
WU - Krit. Schubspannung [N/m²]	2.702	2.497	0.219	7.770		6.651	4.817	3.436					0.513	0.345	0.235	0.164
WU - Kornschubspannung [N/m²]	17.542	17.201	9.355	22.844		32.307	27.167	22.844					9.605	8.077	6.792	5.722
WU - Sedimentkapazität [kg/s]	24.35	25.21	48.71	12.03	49.29	4.37	4.63	8.84	14.15	11.39	3.60	1.29	0.61	0.26	0.12	0.03
EH - Shields-Parameter [-]	0.388	0.420	4.800	0.135		0.034	0.068	0.135	0.270	0.540	1.080	2.160	4.320	8.640	17.280	34.286
EH - Sohl Schubspannung [N/m²]	34.963	34.963	34.963	34.963		34.963	34.963	34.963	34.963	34.963	34.963	34.963	34.963	34.963	34.963	34.963
EH - Sedimentkapazität [kg/s]	56.57	61.20	699.44	19.67	391.11	0.05	0.20	1.38	7.87	22.03	23.61	28.33	44.06	62.95	100.72	99.92

Abbildung 15: Ergebnistabelle der sedimentologischen Berechnung

4.2 Grafiken

Ergebnisfenster mit Grafiken sind im Navigator durch ein Diagramm-Symbol gekennzeichnet. Bei den hydraulischen Ergebnissen wird das Flussquerprofil und der Pegelschlüssel grafisch dargestellt, bei den sedimentologischen Ergebnissen die Korngrößenverteilung und die Sedimentkapazität. Das Ergebnisfenster besteht aus dem Grafikbereich, der Darstellungsspalte, einem Splitter und einer Werkzeugleiste (Abbildung 16). Die Werkzeugleiste beinhaltet unter anderem Optionen zum Zoomen, zur Anpassung des Grafikbereichs und zur Speicherung der Grafik. Nähere Informationen zur Werkzeugleiste findet man in der offiziellen Matplotlib-Dokumentation⁶. Am rechten Fensterrand befindet sich eine Spalte mit einigen Auswahlmöglichkeiten zum Ein- und Ausblenden von Grafikelementen und Datenreihen. Diese Spalte ist mit einem Splitter versehen, wodurch deren Breite geändert werden kann, bzw. kann man die Spalte damit ausblenden.

⁶ www.Matplotlib.org/users/navigation_toolbar.html

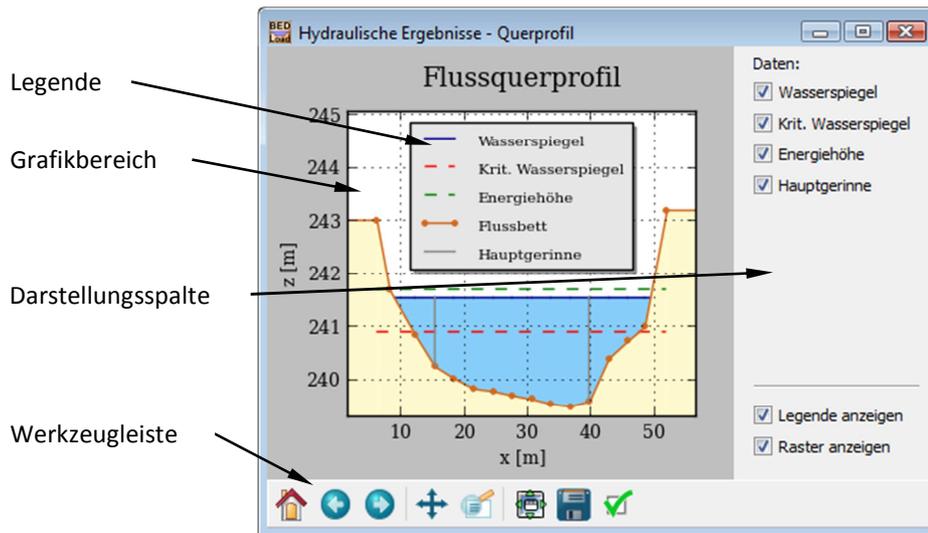


Abbildung 16: Grafikfenster mit Flussquerprofil

Durch Anklicken der Grafikelemente im Grafikbereich wird ein Detailfenster geöffnet, in dem die genauen Werte des gewählten Elements angezeigt werden (Abbildung 17).

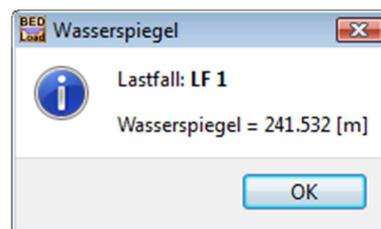


Abbildung 17: Detailfenster

Die Position der Legende kann über das Dialogfenster (Abbildung 18), das durch Anklicken der Legende geöffnet wird, gewählt werden.



Abbildung 18: Dialogfenster für Legendenposition

4.2.1 Hydraulische Ergebnisse - Flussquerprofil

In Abbildung 16 ist das Flussquerprofil mit dem durchflossenen Querschnitt dargestellt. Zusätzlich sind die Linien des kritischen Abflusses und der Energiehöhe in der Grafik sichtbar. Das Hauptgerinne ist durch zwei vertikale Linien abgebildet. Alle dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den ausgewählten Lastfall.

4.2.2 Hydraulische Ergebnisse - Pegelschlüssel

Abbildung 19 zeigt den Pegelschlüssel, der mit dem Abfluss des gewählten Lastfalles begrenzt ist. Es besteht die Möglichkeit, verschiedene Größen auf der x- und y-Achse anzuzeigen.

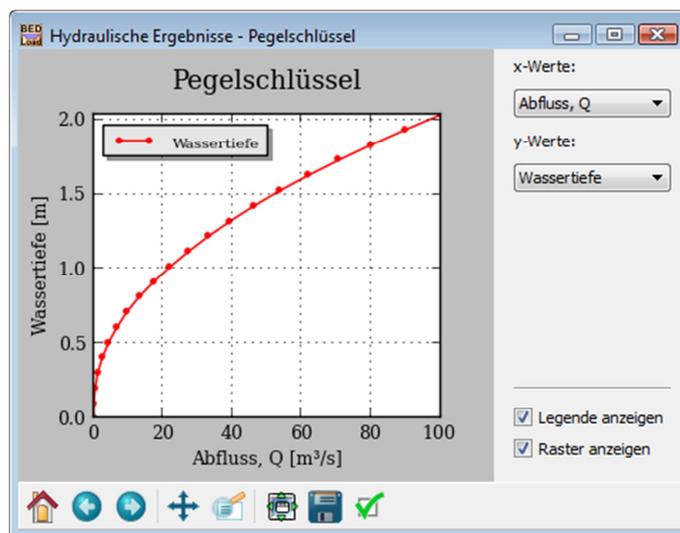


Abbildung 19: Pegelschlüssel

4.2.3 Sedimentologische Ergebnisse - Korngrößenverteilung

Die eingegebene Korngrößenverteilung wird in dieser Grafik geplottet (Abbildung 20). Standardmäßig hat die x-Achse eine logarithmische Skalierung zur Basis Zwei.

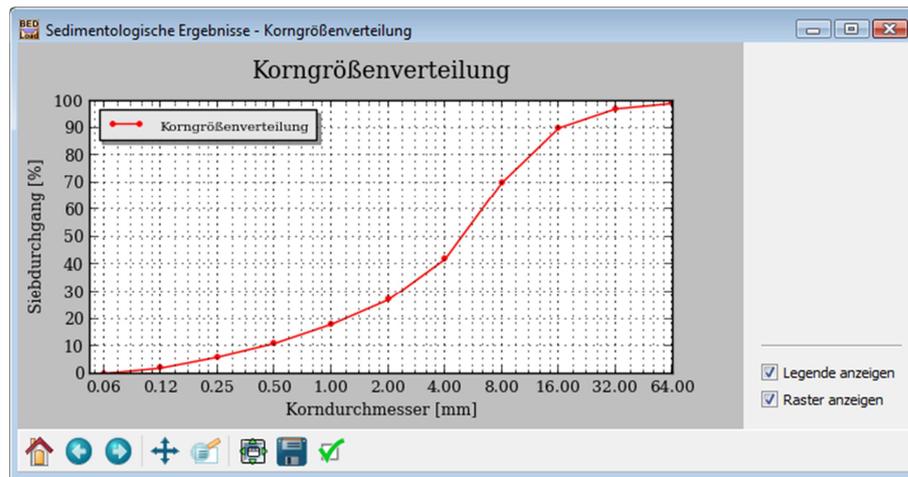


Abbildung 20: Korngrößenverteilung

4.2.4 Sedimentologische Ergebnisse - Sedimentkapazität

Die Beziehung zwischen der Sedimentkapazität und dem hydraulischen Abfluss wird in diesem Grafikfenster gezeigt (Abbildung 21). Dazu werden die Abflüsse der eingegebenen hydraulischen Lastfälle und die zugehörigen errechneten Sedimentkapazitäten für die ausgewählten Transportformeln herangezogen. Die y-Achse hat eine logarithmische Skalierung. Es können die Kurven der verschiedenen charakteristischen Korngrößen sowie die Kurve der Summe der Korngrößenverteilung angezeigt werden.

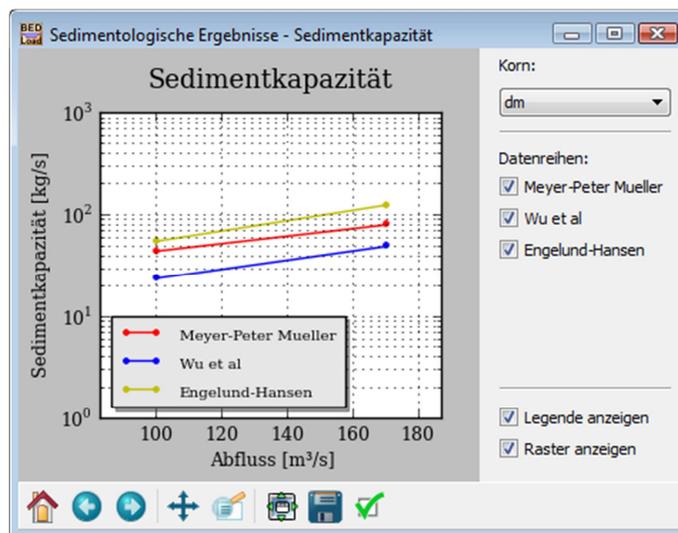


Abbildung 21: Sedimentkapazität

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hauptfenster	3
Abbildung 2: Arbeiten mit dem Modul PRAXIS	6
Abbildung 3: Neues Projekt anlegen	7
Abbildung 4: Eingabemaske Projektbeschreibung	8
Abbildung 5: Eingabemaske Eingaben.....	9
Abbildung 6: Eingabemaske Geometrie	9
Abbildung 7: ASCII-Datei mit Koordinatenpaaren	10
Abbildung 8: Interpolation eines Profilpunktes.....	11
Abbildung 9: Eingabemaske Hydraulische Daten	12
Abbildung 10: Eingabemaske Sedimentologische Daten	13
Abbildung 11: Eingabemaske Berechnung	14
Abbildung 12: Ergebnishauptfenster	15
Abbildung 13: Ergebnishauptfenster mit geöffneten Unterfenstern.....	16
Abbildung 14: Ergebnistabelle der hydraulischen Berechnung	17
Abbildung 15: Ergebnistabelle der sedimentologischen Berechnung.....	18
Abbildung 16: Grafikfenster mit Flussquerprofil	19
Abbildung 17: Detailfenster	19
Abbildung 18: Dialogfenster für Legendenposition.....	19
Abbildung 19: Pegelschlüssel.....	20
Abbildung 20: Korngrößenverteilung	21
Abbildung 21: Sedimentkapazität.....	21

Teil D

Programmierung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Berechnung.....	2
3	Entwicklung des Programms.....	3
3.1	Verwendete Software und Bibliotheken	3
3.1.1	Die Programmiersprache Python.....	3
3.1.2	Die Bibliothek Matplotlib	4
3.1.3	Die Entwicklungsumgebung NetBeans IDE	4
3.1.4	Das GUI-Framework Qt und die Anbindung PyQt.....	4
3.1.5	Das Tool PyInstaller.....	5
3.2	Die Projektdateien	6
3.3	Klassen und Makros	7
3.3.1	Klassen	7
3.3.2	Makros	9
3.4	Generieren der Benutzeroberfläche zu Python-Dateien.....	9
3.4.1	Generieren des GUI-Quellcodes mit pyuic4.....	10
3.4.2	Generieren der Übersetzungsdateien mit pylupdate4 und lrelease	11
3.4.3	Generieren der Ressourcen-Quelldatei mit pyrcc4	12
3.5	Generieren einer ausführbaren Datei mit PyInstaller	12
4	Lizenz.....	14
4.1	Lizenzbedingungen	14
	Literaturverzeichnis	15
	Abbildungsverzeichnis	16
	Tabellenverzeichnis	17

1 Einleitung

Der Bed Load Analyzer wurde in der Programmiersprache Python (Van Rossum, 2013) geschrieben. Aus der Zielsetzung, ein intuitiv zu bedienendes Programm zu entwickeln, war es erforderlich, das Programm mit einer grafischen Benutzeroberfläche zu versehen. Python verfügt zwar über das GUI-Toolkit Tkinter zur Erstellung von grafischen Benutzeroberflächen, jedoch sind die Möglichkeiten mit Tkinter sehr eingeschränkt. Tkinter ist für kleinere Anwendungen gut geeignet, da man damit einfach und schnell zu Ergebnissen kommt. Bei großen Benutzeroberflächen ist Tkinter weniger geeignet, da es eine relativ geringe Auswahl an Grafikobjekten zur Verfügung stellt und da es keine zufriedenstellenden GUI-Editoren zur interaktiven Erstellung von Benutzeroberflächen gibt. Nach ausführlicher Recherche nach geeigneten Bibliotheken zur Erstellung von grafischen Benutzeroberflächen fiel die Entscheidung auf das GUI-Framework Qt. Mit Qt ist man in der Lage, mit einem mitgelieferten Tool - dem Qt-Designer - interaktiv die Benutzeroberfläche zu gestalten. Außerdem werden Werkzeuge zur Internationalisierung der Anwendung angeboten.

Um ein bequemes Arbeiten mit dem Bed Load Analyzer zu gewährleisten, war es erforderlich, den gesamten Code in eine Standalone-Datei zu packen. Damit kann man das Programm ohne jegliche Installation von Python oder Modulen, die zur Programmierung der Anwendung benötigt wurden, anwenden.

Das Programm Bed Load Analyzer wurde in Windows entwickelt. Da der Source-Code frei zur Verfügung gestellt wird, kann auch auf anderen Betriebssystemen das Programm angewendet bzw. kompiliert werden.

In diesem Kapitel wird auf die verwendete Programmiersprache Python sowie auf alle anderen verwendeten Softwares und Bibliotheken eingegangen. Weiters werden die Dateien des Quellcodes und die Codestruktur behandelt. Abschließend wird erläutert, wie man die mit Qt erstellte grafische Benutzeroberfläche in Python-Dateien umwandelt und wie eine Standalone-Datei des Bed Load Analyzers generiert werden kann.

2 Grundlagen der Berechnung

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 1 einen Pseudocode mit dem grundsätzlichen Berechnungsvorgang. Soll eine sedimentologische Berechnung durchgeführt werden, so werden zunächst die Kornfraktionen aus der eingegebenen Korngrößenverteilung sowie die Hiding-Exposure-Faktoren der einzelnen Korngruppen ermittelt. Bei der sedimentologischen Berechnung einer Korngrößenverteilung werden zusätzlich charakteristische Korndurchmesser wie d_m , d_{10} , d_{50} und d_{90} ermittelt. In weiterer Folge wird eine Schleife über alle Lastfälle durchlaufen. In einem Schleifendurchgang, also für einen Lastfall, wird zunächst die kritische Abflusshöhe mittels eines iterativen Prozesses ermittelt. Dann wird je nach eingegebenen Randbedingungen (Wasserspiegel oder Reibungsgefälle bekannt) die eigentliche hydraulische Berechnung durchgeführt und anschließend die Ergebnisse aufbereitet. Bei der sedimentologischen Berechnung werden für jede Korngruppe allgemeine sedimentologische Kennwerte sowie die Transportkapazität mittels der gewählten Transportformeln und schließlich die Gesamttransportkapazität ermittelt

Wenn sedimentologische Berechnung:

Berechne Kornfraktionen

Berechne Hiding-Exposure-Faktoren

Wenn Korngrößenverteilung:

Berechne charakteristische Korndurchmesser

Schleife über alle Lastfälle:

Berechne kritische Abflusshöhe

Wenn Wasserspiegel W bekannt:

Hydraulische Berechnung über W

Wenn Reibungsgefälle S bekannt:

Hydraulische Berechnung über S

Aufbereitung der hydraulischen Ergebnisse

Wenn sedimentologische Berechnung:

Schleife über alle Korngruppen:

Berechne allgemeine sedimentologische Kennwerte

Berechne Sedimenttransportkapazitäten

Abbildung 1: Pseudocode des Berechnungsvorganges

3 Entwicklung des Programms

3.1 Verwendete Software und Bibliotheken

Die zur Entwicklung des Bed Load Analyzers angewandte Programmiersprache Python sowie alle sonstigen benötigten Softwares und Bibliotheken wie Matplotlib, Qt bzw. PyQt oder PyInstaller werden in diesem Abschnitt beschrieben. Für weitere Informationen wird auf die jeweiligen Herausgeber-Homepages verwiesen.

3.1.1 Die Programmiersprache Python

Python¹ ist eine sehr leistungsstarke dynamische Programmiersprache, die neben der objektorientierten Programmierung auch andere Programmierparadigmen wie aspektorientierte und funktionale Programmierung unterstützt. Bei dieser Anfang der 1990er Jahre entwickelten Programmiersprache handelt es sich um eine Skriptsprache, was sich dadurch auszeichnet, dass auf eine Deklaration von Variablen verzichtet werden kann. Dadurch ist diese Programmiersprache im Vergleich zu anderen Programmiersprachen sehr leicht erlernbar. Die große Standardbibliothek und die Möglichkeit der Erweiterung durch Pakete wie NumPy oder Matplotlib machen Python zu einer mächtigen Alternative zu anderen Skriptsprachen. Bei der Entwicklung dieser höheren Programmiersprache wurde hohes Augenmerk auf die leichte Lesbarkeit und einfache Strukturierung gelegt. Anders als in den Programmiersprachen C++ oder Java, bei denen geschweifte Klammern dazu dienen, Codestrukturen zu kennzeichnen, verwendet Python Einrückungen, wodurch die Lesbarkeit erheblich gesteigert wird. Python ist freie Software, läuft plattformunabhängig und steht auch für kommerzielle Produkte unter einer Open-Source-Lizenz. Für die Entwicklung des Bed Load Analyzers wurde Python 2.7.3 verwendet. Auf eine Einführung in das Programmieren mit Python wird in dieser Arbeit verzichtet und stattdessen auf die offizielle Dokumentation (Van Rossum, 2013) verwiesen.

¹ Python Software Foundation, <http://www.python.org>

3.1.2 Die Bibliothek Matplotlib

Matplotlib² ist ein freies Open-Source-Paket für Python zum Plotten von 2D-Diagrammen in Publikationsqualität. Es zeichnet sich durch sehr einfache Befehle aus, welche sehr an die Befehle von MATLAB® angelehnt, jedoch vollständig unabhängig davon sind. Für den Bed Load Analyzer wurde Matplotlib 1.2.0 (Hunter, 2007) verwendet.

3.1.3 Die Entwicklungsumgebung NetBeans IDE

Als Entwicklungsumgebung wurde die freie Software NetBeans IDE 6.5³ verwendet. Es handelt sich um ein Open-Source-Projekt, das in Java geschrieben worden ist. NetBeans IDE unterstützt direkt einige geläufige Programmiersprachen wie Java, C, C++ und PHP und kann durch Plugins um weitere Sprachen (unter anderem auch Python) ergänzt werden.

Anstelle von NetBeans können auch andere Entwicklungsumgebungen verwendet werden. Als Beispiel soll hier PyScripter⁴ angeführt werden, die für Python entwickelt worden ist, sehr einfach zu bedienen ist, stabil läuft und auch Open-Source ist.

3.1.4 Das GUI-Framework Qt und die Anbindung PyQt

Qt⁵ ist eine C++-Klassenbibliothek für die Programmierung grafischer Benutzeroberflächen. Die Bibliothek steht unter einem dualen Lizenzsystem. Für nicht-kommerzielle Softwareprodukte steht Qt unter der GNU General Public License zur Verfügung, bei kommerzieller Nutzung muss die Bibliothek unter einer proprietären Lizenz erworben werden. Zusätzlich zur Standardbibliothek liefert Qt nützliche Werkzeuge, wie den Qt Designer oder Qt Linguist. Der Qt Designer dient zum interaktiven Erstellen von Benutzeroberflächen. Qt Linguist ist ein Werkzeug zur Internationalisie-

² <http://matplotlib.org>

³ Oracle Corporation, <http://netbeans.org>

⁴ <https://code.google.com/p/pyscripter>

⁵ Qt Project, <http://qt-project.org>

rung und dient zum Übersetzen von Texten, die in der Benutzeroberfläche ersichtlich sind.

Qt verfügt über ein Signal-Slot-Konzept, das es ermöglicht, auf eine einfache Weise Grafikobjekte zu verknüpfen. Ein Signal wird gesendet, wenn ein bestimmtes Ereignis eintritt. Ein solches Ereignis kann beispielsweise ein Mausklick auf ein bestimmtes Grafikelement sein. Ein Slot ist eine Funktion, die ausgeführt wird, wenn ein Signal gesendet wurde. Es können mehrere Signale mit einem Slot verknüpft werden, und umgekehrt. Signale und Slots können zwar im Qt Designer definiert werden, jedoch wurden in dieser Arbeit die Signale und Slots manuell im Code programmiert, wodurch eine höhere Funktionalität und Flexibilität erreicht werden kann.

Das GUI-Framework Qt ist nicht nur für C++ anwendbar, es gibt eine Vielzahl an Anbindungen für andere Programmiersprachen. Die Anbindung von Qt an Python ist PyQt⁶. Die Werkzeuge Qt Designer und Qt Linguist sind in jeder Anbindung gleich, da damit unabhängig von der Programmiersprache XML-Files erstellt werden. Anders sind hingegen die mitgelieferten Module wie uic, rcc oder lupdate, die aus den XML-Files den eigentlichen Python-Code generieren. In der Python-Anbindung heißen diese Module pyuic4, pyrcc4 und pylupdate4, deren Funktion und Anwendung in Abschnitt 3.4 erläutert wird. Bei der Entwicklung des Bed Load Analyzer wurde mit Qt 4.8.4 und der Python-Anbindung PyQt 4.9.5 gearbeitet. Eine sehr gute Einführung in die Programmierung grafischer Benutzeroberflächen mit Python und Qt gibt Summerfield (2007).

3.1.5 Das Tool PyInstaller

Um Python-Skripte auf einem Rechner ausführen zu können, ist eine Installation von Python erforderlich. Mit Hilfe des Tools PyInstaller (Bajo & Caban, 2012) können Python-Programme in eine ausführbare Datei (*.exe) umgewandelt werden. Dies hat den Vorteil, dass Python nicht installiert sein muss, um ein Programm auszuführen, das in Python geschrieben worden ist. In Abschnitt 3.5 wird beschrieben, wie man aus Py-

⁶ Riverbank Computing Limited, <http://www.riverbankcomputing.co.uk>

thon-Dateien eine ausführbare Datei erstellt. PyInstaller benötigt das Paket `pywin32`⁷, das Python-Erweiterungen für Windows zur Verfügung stellt.

3.2 Die Projektdateien

Der Source-Code des Projekts besteht aus Dateien verschiedener Dateiformate, die zusammenfassend in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Tabelle 1: Übersicht auf Dateiformate

Dateiendung	Beschreibung
*.py	Python-Datei: geschrieben, generiert mit <code>pyuic4</code> aus Qt Designer-Datei oder generiert mit <code>pyrcc4</code> aus Ressourcen-Datei
*.ui	Qt Designer-Datei: grafische Benutzeroberfläche im XML-Format
*.qrc	Ressourcen-Datei: Ressourcen im XML-Format
.pro (.properties)	Properties-Datei: beinhaltet die Namen der Python-Dateien, die in der Benutzeroberfläche zu übersetzende Texte enthalten und Dateinamen der zu erstellenden Übersetzungsquelldateien
*.ts	Übersetzungsquelldatei: alle zu übersetzenden Texte im XML-Format, generiert mit <code>pylupdate4</code> und Properties-Datei
*.qm	Übersetzungsdatei: generiert mit <code>lrelease</code> aus Übersetzungsquelldatei
*.png	Bilddatei: Icons und Logos
*.ico	Symboldatei

Die Python-Dateien (*.py) sind entweder geschrieben oder generiert worden. Dateien mit den Endungen *.ui beinhalten die grafische Benutzeroberfläche im XML-Format. In der Datei mit der Endung *.qrc sind alle Ressourcen (Bilddateien mit der Endung *.png und Übersetzungsdateien mit der Endung *.qm) im XML-Format zusammengefasst. In der Properties-Datei *.pro sind alle Python-Dateien aufgelistet, die in der Benutzeroberfläche sichtbare Zeichenketten enthalten. Diese Datei wird vom PyQt-Tool

⁷ <https://pypi.python.org/pypi/pywin32/214>

pylupdate4 benötigt, um solche Zeichenketten aus dem Python-Code zu extrahieren und in eine Übersetzungsquelldatei (*.ts) zu schreiben. Die Übersetzungsdateien (*.qm) werden mit dem PyQt-Tool Irelease aus der Übersetzungsquelldatei (*.ts) nach erfolgter Übersetzung in die jeweilige Sprache generiert. Die Symboldatei (*.ico) wird zum Erstellen einer ausführbaren Datei benötigt. In Abschnitt 3.4 wird beschrieben, wie die diversen Dateien, die im XML-Format vorliegen, in Python-Dateien umgewandelt werden können.

3.3 Klassen und Makros

3.3.1 Klassen

Ein vereinfachtes Klassendiagramm ist in Abbildung 2 (Seite 8) dargestellt. Dabei sind nur die Namen der geschriebenen Klassen und deren Dateinamen ersichtlich. Nicht gezeigt werden Attribute und Methoden sowie generierte Klassen, welche die grafische Benutzeroberfläche beinhalten.

Grundsätzlich kann man den Quellcode in folgende Arten von Klassen unterteilen:

- Berechnungsklassen, in welchen die Berechnungen durchgeführt werden
- GUI-Klassen, welche die grafische Benutzeroberfläche beinhalten
- Wrapper-Klassen, Schnittstelle zwischen GUI- und Berechnungsklassen

Die Berechnung erfolgt mit den Berechnungsklassen, deren Modulnamen das Format calc*.py aufweisen. Eine Berechnung beinhaltet die Projektbeschreibung, alle Eingangsgrößen, eine Klasse zur hydrodynamischen Berechnung und die Klassen zur Durchführung der sedimentologischen Berechnung. Die Berechnungsklassen sind komplett unabhängig von der grafischen Benutzeroberfläche und können auch für Projekte außerhalb des Bed Load Analyzers angewendet werden!

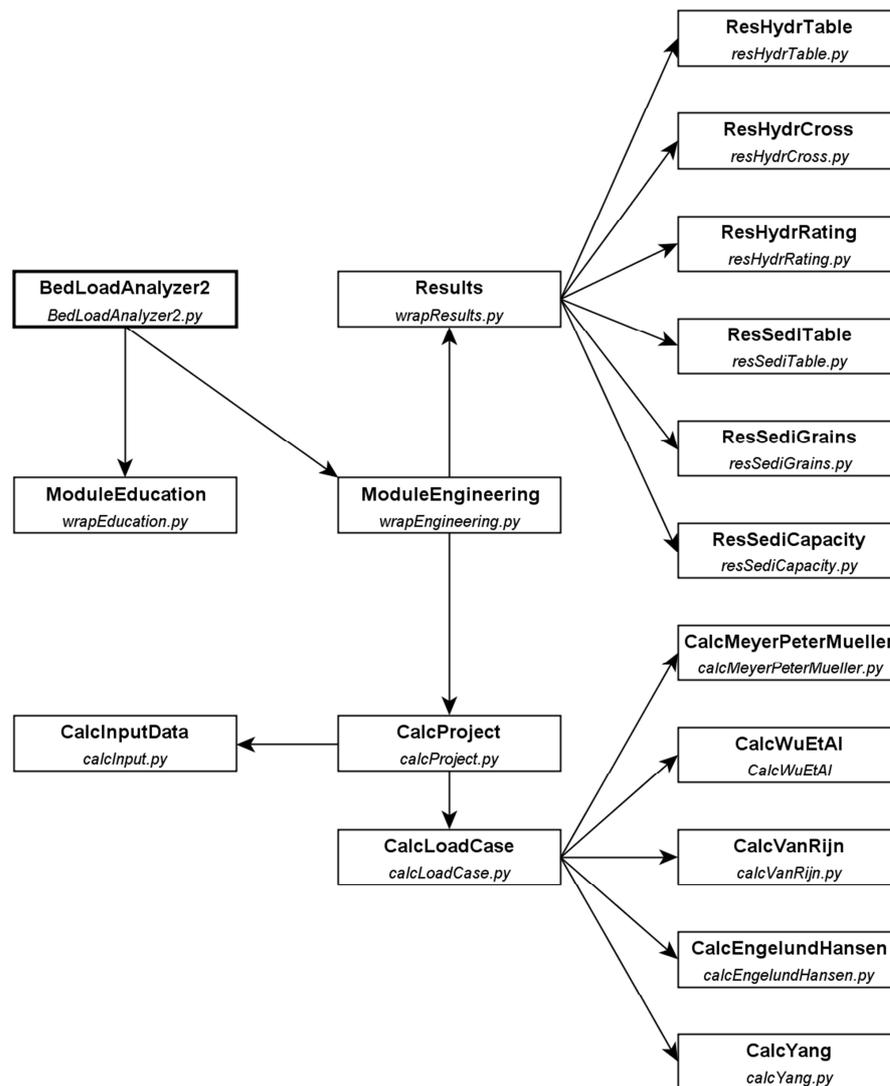


Abbildung 2: Vereinfachtes Klassendiagramm

Die GUI-Klassen beinhalten die Objekte der grafischen Benutzeroberfläche und werden aus den Qt Designer-Dateien generiert. Die Dateinamen dieser Klassen haben das Format ui*.py. Eine manuelle Bearbeitung dieser generierten Klassen soll vermieden werden, da bei neuerlicher Generierung die gesamte Klasse überschrieben wird und damit manuell eingefügte Syntax verloren geht.

Wrapper-Klassen sind Klassen, welche die Schnittstellen zwischen der grafischen Benutzeroberfläche und den Berechnungsklassen bilden. Sie sind in den Modulen mit den Dateinamen wrap*.py deklariert. In diesen Klassen können Objekte der grafischen Benutzeroberfläche der instanziierten GUI-Klasse bearbeitet oder geändert werden. Die vom Benutzer in die Eingabefelder und Tabellen eingegebenen Werte werden einge-

sen, verarbeitet (z. B. gerundet, sortiert) und den Berechnungsklassen zur Verfügung gestellt. Die Verknüpfung der grafischen Benutzeroberfläche mit Benutzersignalen beruht auf dem bereits genannten Signal-Slot-Konzept von Qt.

Bei der Klasse der Hauptdatei `BedLoadAnalyzer2.py` handelt es sich ebenfalls um eine Wrapper-Klasse, welche die Benutzeroberfläche des Hauptfensters instanziiert. Die Menüleiste und die Werkzeugleiste wurden nicht in der GUI-Klasse (bzw. im Qt Designer) erstellt, sondern in der Wrapper-Klasse. Dies liegt an der damit erreichbaren höheren Anpassfähigkeit und Flexibilität, da die Inhalte der Menüleiste und der Werkzeugleiste je nach gewähltem Modul PRAXIS oder LEHRE aktualisiert werden müssen und dies im Qt Designer nur schwer oder gar nicht auszuführen ist.

3.3.2 Makros

Dateien mit dem Präfix `macro` (`macro*.py`) sind Module, die globale Variablen enthalten. Der Zweck von derartigen globalen Variablen ist, dass sie in jedem Modul, in dem sie gebraucht werden, importiert werden können, ohne sie als Parameter in Konstruktoren oder Funktionen mitschleppen zu müssen. Die Dateien `macroData.py` oder `macroString.py` sind beispielsweise solche Makros mit global definierten Variablen, Listen und Verzeichnissen.

Makros können auch Funktionen enthalten, welche in mehreren Klassen aufgerufen werden. Durch Importieren eines Makros in ein Modul können die darin enthaltenen Funktionen angewendet werden. Damit erspart man sich die Programmierung ein und derselben Methode in mehreren verschiedenen Klassen. Der Vorteil dabei ist, dass eine eventuelle Änderung der Funktion nur im Makro durchzuführen ist.

3.4 Generieren der Benutzeroberfläche zu Python-Dateien

Die grafische Benutzeroberfläche wird mit dem Qt Designer interaktiv erzeugt. Auch die Ressourcen werden im Qt Designer zusammengestellt. Für die Internationalisierung dient Qt Linguist, mit dem aus dem Python-Code extrahierte Zeichenketten in diverse Sprachen übersetzt werden können. All diese Dateien liegen im

Es wird davon abgeraten, generierte Python-Dateien (ui*.py) umzuschreiben, da der gesamte Inhalt bei einer neuerlichen Generierung überschrieben wird und somit manuell eingegebene Syntax unwiderruflich verloren geht. Es empfiehlt sich, für jede generierte Benutzeroberfläche einen Wrapper zu schreiben, welcher die generierte GUI-Klasse instanziiert. Darin können dann ohne Bedenken Änderungen und Ergänzungen zur Benutzeroberfläche (z. B. Signale und Slots, Menüs, etc.) durchgeführt werden, ohne dass diese bei erneuter Generierung verloren gehen.

3.4.2 Generieren der Übersetzungsdateien mit pylupdate4 und lrelease

Mit dem PyQt-Modul pylupdate4 werden aus allen Python-Dateien, welche in der Datei BedLoadAnalyzer2.properties angegeben sind, die zu übersetzenden Zeichenketten herausgefiltert und in die Übersetzungsquelldateien (*.ts) geschrieben, deren Dateinamen ebenfalls in BedLoadAnalyzer2.properties definiert sind:

```
C:\Bla2>pylupdate4 BedLoadAnalyzer2.properties
```

Die generierten Übersetzungsquelldateien (*.ts) können nun mit Qt Linguist in die jeweiligen Sprachen (hier Deutsch und Englisch) übersetzt werden. Ein wiederholtes Ausführen des Moduls pylupdate4 hat nicht zur Folge, dass bereits durchgeführte Übersetzungen gelöscht oder überschrieben werden. Falls neue Zeichenketten gefunden werden, werden diese in den Übersetzungsquelldateien (*.ts) hinzugefügt. Wenn Zeichenketten im Code gelöscht werden und somit beim Generieren nicht mehr erkannt werden, so werden diese Zeichenketten im Qt Linguist deaktiviert, bleiben aber sichtbar.

Schließlich können mit dem PyQt-Modul lrelease die Übersetzungsdateien (*.qm) aus den Übersetzungsquelldateien (*.ts) generiert werden:

```
C:\Bla2>lrelease BedLoadAnalyzer_DE.ts  
C:\Bla2>lrelease BedLoadAnalyzer_EN.ts
```

Die Datei qt_de.qm wird aus dem Verzeichnis "C:\Python27\Lib\site-packages\PyQt4\translations" kopiert. Sie wird von PyQt zur Verfügung gestellt und enthält Standardübersetzungen beispielsweise für Standarddialoge oder Shortcuts.

3.4.3 Generieren der Ressourcen-Quelldatei mit pyrcc4

Die Ressourcen werden im Qt Designer zusammengestellt und in der Datei resource.qrc gespeichert. Diese Datei liegt im XML-Format vor und beinhaltet die Dateinamen der zu den Ressourcen hinzugefügten Bilddateien und Übersetzungsdateien. Das PyQt-Modul pyrcc4 wandelt die Ressourcen-Datei in eine Python-Datei um:

```
C:\Bla2>pyrcc4 resource.qrc -o resource_rc.py
```

Sobald eine neue Übersetzungsdatei (siehe Abschnitt 3.4.2) generiert worden ist, muss auch die Ressourcen-Quelldatei neu generiert werden, da diese die Übersetzungsdateien enthält. Ansonsten werden geänderte Übersetzungen nicht übernommen.

3.5 Generieren einer ausführbaren Datei mit PyInstaller

Um den Bed Load Analyzer unabhängig von Python und anderen verwendeten Modulen ausführen zu können, kann mit PyInstaller aus dem Quellcode ein Standalone-Programm generiert werden. Es gibt zwei grundsätzliche Methoden, ein Standalone-Programm zu erstellen. Mit der ersten Methode wird das Python-Programm in eine einzelne Datei gepackt. Diese Methode hat den Vorteil, dass die Programmgröße relativ klein ist. Nachteilig ist der langsame Startvorgang, da beim Starten des Programmes die benötigten Dateien in ein temporäres Verzeichnis entpackt werden müssen. Die zweite Methode erstellt das Standalone-Programm in einem Verzeichnis, in welches zusätzlich alle benötigten Binär-Dateien abgelegt werden. Dies hat zwar den Nachteil, dass die Programmgröße gegenüber der ersten Methode größer ist, jedoch geht der Startvorgang des Programms schneller vor sich.

Der Ablauf zur Erstellung einer Standalone-Datei wird in Abbildung 4 dargestellt. Mit dem Modul Makespec.py wird aus der Hauptdatei (BedLoadAnalyzer2.py) eine spec-Datei erstellt. Dabei können verschiedene Optionen angegeben werden, um beispielsweise eine einzelne ausführbare Datei zu erstellen, ein Starten des Programmes ohne Öffnen der Eingabeaufforderung zu gewährleisten oder um ein Icon hinzuzufügen:

```
C:\Bla2>C:\pyinstaller-2.0\utils\Makespec.py --onefile  
--windowed --icon=icon.ico BedLoadAnalyzer2.py
```

Das Modul Makespec.py analysiert alle Module, die von der Hauptdatei und dessen Unterprogrammen erforderlich sind, weshalb für dieses Modul auch nur die Hauptdatei anzugeben ist. Aus der spec-Datei wird dann mit dem Modul Build.py die ausführbare exe-Datei erstellt:

```
C:\Bla2>C:\pyinstaller-2.0\utils\Build.py BedLoadAn-  
alyzer2.spec
```

Die ausführbare Datei befindet sich im Ordner dist und kann unabhängig von anderen Dateien oder Programmen auf jedem beliebigen Windows-Rechner ausgeführt werden. Der Ordner build wird von PyInstaller zur Erstellung des Standalone-Programms benötigt und kann gelöscht werden.

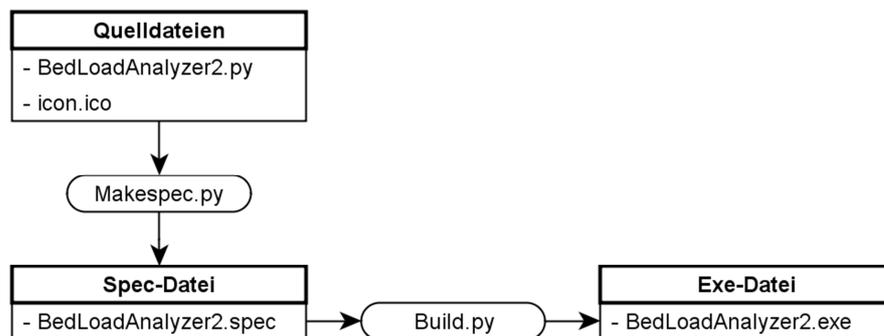


Abbildung 4: Erstellung eines Standalone-Programms mit PyInstaller

4 Lizenz

Beim Bed Load Analyzer handelt es sich um freie Software, die unter der GNU General Public License⁹ (GNU GPL) steht. Dem Endnutzer werden die Freiheiten garantiert, die Software nutzen, studieren, verbreiten und ändern zu dürfen. Der Quellcode muss offengelegt werden. Grundsätzlich dürfen GPL-lizenzierte Werke kommerziell oder kostenlos vertrieben werden. Der Bed Load Analyzer wird kostenlos zur Verfügung gestellt und darf nicht kommerziell weitergegeben werden, wodurch das verwendete Framework Qt, das auch unter der GNU GPL steht, unentgeltlich genutzt werden darf.

4.1 Lizenzbedingungen

Beim folgenden Text handelt es sich um die Lizenzbedingungen des Bed Load Analyzers, die auch im Quellcode angeführt sind:

"This program or module is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 2 of the License, or version 3 of the License, or (at your option) any later version. This program or module and its documentation is provided for engineers, educational purposes, research and for non-profit consulting purposes and is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. In no event shall TU Graz be liable to any party for direct, indirect, special, incidental, or consequential damages, including lost profits, arising out of the use of this software and its documentation, even if TU Graz has been advised of the possibility of such damage. See the GNU General Public License for more details."

⁹ <http://www.gnu.org/licenses>

Literaturverzeichnis

Bajo, G. & Caban, W. (2012). PyInstaller Manual. Abgerufen am 31. 07. 2013 von <http://www.pyinstaller.org/export/v2.0/project/doc/Manual.pdf?format=raw>

Hunter, J. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*. IEEE Computer Society.

Summerfield, M. (2007). *Rapid GUI Programming with Python and Qt*. Prentice Hall.

Travis, O. (2006). Guide to NumPy. Abgerufen am 31. 07. 2013 von <http://www.numpy.org>

Van Rossum, G. (2013). Python Language Website. Abgerufen am 31. 07. 2013 von <http://www.python.org>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Pseudocode des Berechnungsvorganges	2
Abbildung 2: Vereinfachtes Klassendiagramm	8
Abbildung 3: Schema der Dateigenerierung.....	10
Abbildung 4: Erstellung eines Standalone-Programms mit PyInstaller	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht auf Dateiformate	6
---	---