



Martina Hauser, BSc

Bestimmung von Sohlrauheiten in natürlichen Gerinnen mittels terrestrischem Laserscanning

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom-Ingenieurin

Masterstudium

Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef Schneider
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Dipl.-Ing. Sebastian Gegenleithner BSc
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Graz, Dezember 2020

Betreuer der Masterarbeit:
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef Schneider

.....

Mitbetreuender Assistent:
Dipl.-Ing. Sebastian Gegenleithner BSc

.....

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum, Unterschrift

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei meinem Betreuer Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef Schneider und dem mitbetreuenden Assistenten Dipl.-Ing. Sebastian Gegenleithner BSc für ihre fachliche und motivierende Betreuung bedanken. Im Speziellen besonders dafür, dass sie stets bereit waren, auf meine eigenen Ideen und Vorschläge einzugehen und immer ein offenes Ohr für mich hatten.

Ebenso gilt ein weiteres Dankeschön allen Mitarbeitern des Labors vom Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der TU Graz, die mich tatkräftig bei meinen Messungen unterstützt und begleitet haben.

Weiters gilt mein Dank Dipl.-Ing. Peter Bauer BSc vom Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme für seine kompetente und hilfsbereite Beratung in allen Angelegenheiten rund um den Laserscan.

Zusätzlich möchte ich mich herzlichst bei Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz und seinem Team vom Labor des Instituts für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik bedanken. Dafür, dass sie mir sowohl mit dem Equipment als auch Erklärungen und Hilfestellungen während der Siebanalyse zur Seite gestanden haben.

Nicht zuletzt bedarf es auch meinen Eltern, Verwandten und Freunden einem Dankeschön dafür, dass sie mich durch diese Zeit so geduldig und ermutigend begleitet haben.

DANKE!

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit thematisiert die Bestimmung von Rauheiten von Sedimentflächen mittels terrestrischem Laserscan. Im Zuge der Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, mittels Oberflächendaten aus dem Scan auf Korngrößen und damit auf die Oberflächenrauheit Rückschlüsse ziehen zu können.

Im Zuge einer Literaturrecherche wurden verschiedene Anwendungsbeispiele der Oberflächendetektion mittels Laserscan betrachtet. Die Arbeit bezieht sich auf die Ergebnisse dieser Recherche, vertieft sich aber auf die Bestimmung von Rauheiten in Flüssen, welche im Wasserbau eine tragende Rolle spielen.

Basierend auf der Annahme, dass aus Beobachtungen und Messungen der Oberfläche von Sedimentanlandungen im Uferbereich und im Bachbett auf die Oberfläche der Flusssohle geschlossen werden kann, konnte eine Python-basierte Software zur Berechnung der Größe der Sedimente entwickelt werden. Dieses wurde anschließend durch mehrfache Messungen in der Natur und deren Auswertungen verfeinert und validiert.

In der Arbeit werden sowohl die Grundlagen, auf denen aufgebaut wurde, sowie die einzelnen Messungen, deren Auswertungsmethoden (Vergleich von Siebanalysen und fotografischen Auswertungen mit dem entwickelten Programm) und die Rückschlüsse daraus erläutert. Ebenso werden die finalen Ergebnisse und Schlussfolgerungen dargestellt.

Es zeigt sich, dass mit der entwickelten Python-basierten Methode, im Bereich der auftretenden Ungenauigkeiten solcher Bestimmungen, plausible Ergebnisse für die Korngrößen und damit für die Stricklerauheiten erzielt werden können.

Abstract

The present master thesis deals with the determination of roughness values of sedimentation areas with the help of terrestrial laser scanning. In this thesis, a method was developed which enables conclusions to grain sizes and thus about the surface roughness data by using laserscan data.

Various application examples of surface detection using laser scans were examined through a literature research. The thesis is based on this research but focuses on the determination of roughness parameters in rivers, which play an important role in hydraulic engineering.

Based on the assumption that observations and measurements of the surface of sediment landings in the bank area and in the streambed can be used to deduce the surface of the river bed, a Python-based script for calculating the size of the sediments could be developed. This script was afterwards refined and validated through multiple measurements in nature and their evaluations.

The thesis explains the basics on which it was built, as well as the individual measurements, their evaluation methods (comparison of sieve analysis and photographic evaluations with the developed program) and the conclusions drawn out of it. The final results and conclusions are also shown.

It turns out that, with the developed Python-based method, plausible results for the grain sizes and thus for the roughness values after Strickler can be achieved within the inaccuracies of such determinations.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iv
Kurzfassung	v
Abstract	vi
Inhaltsverzeichnis	vii
1. Einleitung	1
2. Theorie	3
2.1 Fließwiderstand	3
2.1.1 Logarithmische Fließgesetze	3
2.1.2 Empirische Fließgesetze (Potenzgesetze)	4
2.1.3 Variable Power Equation (variables Potenzgesetz)	5
2.2 Rauheitsbeiwerte nach Strickler	6
2.2.1 Berechnung der Stricklerwerte	7
2.2.2 Literaturwerte	11
2.3 Rauheiten-Bestimmung mittels terrestrischem Laserscan	12
3. Methodik	16
3.1 Grundlage	16
3.2 Python Auswertungsmethode	21
3.2.1 Laserscanner	21
3.2.2 Auslesen der Laserdaten	22
3.2.3 Implementierung in Python	23
3.3 Vergleichsauswertungsmethoden	25
3.3.1 Siebanalyse	25
3.3.2 Fotosiebung	27
3.4 Messungen	31
3.4.1 Laborversuch	31
3.4.2 Naturmessungen	32
4. Auswertungen und Ergebnisse	38
4.1 Teilergebnis 1: Laborversuch	38

4.2	Teilergebnis 2: Erste Messung in Oberwölz	40
4.3	Zwischenergebnisse	46
4.3.1	Ergebnisse Konvergenzstudie	46
4.3.2	Gewonnene Erkenntnisse für die Evaluierungsmessung	46
4.4	Teilergebnis 3: Zweite Messung in Oberwölz	47
4.4.1	Vergleich: Mit und ohne Filter	47
4.4.2	Vergleich: Unterschiedlich große Bereiche	49
4.4.3	Endgültige Ergebnisse und deren Abweichungen	51
4.5	Rauheitsbeiwerte nach Strickler	56
4.6	Gesamtergebnis	61
5.	Fazit	62
5.1	Vorteile	62
5.2	Nachteile	62
5.3	Verbesserungsmöglichkeiten	63
5.4	Zusammenfassung	63
6.	Abbildungsverzeichnis	65
7.	Tabellenverzeichnis	67
8.	Literaturverzeichnis	69
9.	Anhang	72
9.1	Code	72
9.2	Fotodokumentation der zweiten Naturmessung	76

1. Einleitung

Die Forschung im Wasserbau ist sehr facettenreich und beschäftigt sich mit den unterschiedlichsten Themenbereichen. Dazu zählt unter anderem auch die Forschung im Sedimentbereich und Abflussgeschehen.

Die Feststellung von Rauheiten spielt seit jeher eine tragende Rolle in der Hydraulik. Speziell für die Berechnung von Strömungszuständen über verschiedenste Fließformeln geht die Rauheit direkt ein. Damit ist auch klar ersichtlich, dass das Abflussgeschehen wesentlich von der Beschaffung der gewässerumgebenden Oberflächen bestimmt wird. Die Bestimmung dieser Kenngröße ist allerdings nicht ganz einfach. Mit der sich ständig weiterentwickelnden Lasertechnologie wird mit dieser Arbeit versucht, mittels modernster und möglichst automatisierter Technik aus den Scandaten Werte für die Rauheitsanalyse herauszufiltern.

Ziel der Arbeit ist es daher, eine möglichst schnelle und einfach zu handhabende Methode zu entwickeln, bei der die Rauheiten mittels Laserscan ermittelt werden können.

Zur Erreichung dieses Ziels muss im Wesentlichen eine Berechnungsmethode angewandt werden, mit der die erforderlichen Scandaten extrahiert und schlussendlich zu Korngrößen umgerechnet werden können. Dazu ist es auch nötig, diese errechneten Korndurchmesser durch andere Methoden zu bestimmen und die Ergebnisse zu vergleichen, um so eine Validierungsmöglichkeit zu schaffen.

Es gab bereits eine Untersuchung (Adams et al., 2012, siehe Kapitel 3.1), bei der ein Verfahren entwickelt wurde, um mittels Laserscan auf den Radius von Kugeln zu schließen. Dabei wird eine fiktive Ebene eingezogen, welche die Kugeln durchschneidet. Anschließend werden in dieser Untersuchung über die maximalen Abstände zu dieser Ebenen die Radien beziehungsweise Durchmesser errechnet (Adams et al., 2012). Die mit dieser Methode errechneten Korndurchmesser können dann anschließend über empirische Formeln auf die Rauheitsbeiwerte umgerechnet werden (siehe Kapitel 2.2.1).

Grundlegend basiert die Idee dieser Arbeit auf dem zuvor beschriebenen Ansatz nach Adams et al. (2012). Es wird versucht, ein Verfahren zu entwickeln, welches es ermöglicht, auch bei verschiedenen Korndurchmessern auf den durchschnittlichen Korndurchmesser schließen zu können. Dazu werden am Schöttlbach in Oberwölz verschiedene Flächen von circa einem Quadratmeter (auch als Bereiche bezeichnet) entlang der Ufer und auf Schotterbänken markiert, die sowohl mit dieser Methode, als auch über die Entnahme von Bodenproben und die Analyse durch das Programm Basegrain (das im Kapitel 3.3.2 erläutert wird) ausgewertet werden. Anschließend müssen die Korngrößen der unterschiedlichen Methoden miteinander verglichen und die Python-basierte Software kalibriert werden. Um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten, sollen die Proben ein relativ breites Spektrum an verschiedenen Korngrößen abdecken. Am Ende soll ein Programm entstehen, welches es möglich macht, aus den Laserscan-Daten auf die Rauheitsbeiwerte zu schließen.

2. Theorie

2.1 Fließwiderstand

Mit dem Fließwiderstand wird die Reibung des fließenden Wassers an der Gerinnesohle und an Uferböschungen beschrieben. Für einen gegebenen Abfluss beziehungsweise eine gegebene Abflusstiefe kann so bestimmt werden, wie schnell das Wasser im Gerinne im Mittel über den durchflossenen Querschnitt fließt. Ebenso spielt der Fließwiderstand eine wichtige Rolle im Hinblick auf den Geschiebetransport (Rickenmann, 2014). Exemplarisch kann zwischen folgenden Fließgesetzen unterschieden werden:

2.1.1 Logarithmische Fließgesetze

In Reinwasserabflüssen kann zur Bestimmung des Fließverhaltens das universelle, logarithmische Fließgesetz nach Colebrook-White und der Reibungskoeffizient nach Darcy-Weisbach verwendet werden (Dittrich, 1998; Bezzola, Gantenbein, Hollenstein, Minor, 2002).

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{a h}{k_s} \right) \quad [1]$$

$$\frac{v}{v^*} = \frac{v}{\sqrt{g h S}} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad [2]$$

Gleichung [1] zeigt das allgemeine Widerstandsgesetz, bei dem die Van Karman-Konstante ($\kappa=0,4$ [-]), eine Integrationskonstante (a , häufig $a=12$ [-]) ebenso wie die relative Abflusstiefe (h [m]), als Quotient zwischen äquivalenter Rauheit beziehungsweise „Sandrauheit“ (k_s [m]) und Abflusstiefe [m] eingeht. In der Gleichung beschreibt f den Reibungskoeffizienten nach Darcy-Weisbach [-], v die mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s], S das Gerinnegefälle (beziehungsweise das Reibungsgefälle [m/m]) und v^ die Schubspannungsgeschwindigkeit ($=0,5*ghS$ [m/s]) (Rickenmann, 2014).*

k_s ist proportional zu D_x und D_x beschreibt die charakteristische Korngröße [m] für welche $x\%$ des Materials feiner sind. Diese bezieht sich bei allen Fließformeln

auf die Kornverteilung des Oberflächenmaterials beziehungsweise der Deckschicht (Rickenmann, 2014).

Die vertikale Geschwindigkeitsverteilung bei steilen und rauen Gerinnen kann teilweise bedeutend vom logarithmischen Geschwindigkeitsgesetz abweichen (Rickenmann, 2014).

Neben der Rauheitshöhe k_s ist auch die Sohlstruktur bedeutend für die Bestimmung des Fließwiderstands. Die Ableitung von k_s über charakteristischen Korndurchmesser ist daher über eine empirische Beziehung aus geometrischer Rauheit, Packung und Anordnung der Rauheitselemente möglich. Diese funktionalen Beziehungen müssen als Anhaltswerte angesehen werden. Es existieren unterschiedliche Formulierungen, welche basierend auf den logarithmischen Fließgesetzen den Fließwiderstand bestimmen (Rickenmann, 2014). Eine davon ist die Bestimmung nach Keulegan (1938):

$$\frac{V}{v^*} = 6,25 + 5,62 * \log\left(\frac{h}{k_s}\right) \quad [3]$$

Durch mehrere Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass zwischen relativer Abflusstiefe, äquivalenter Rauheit (k_s) und Gerinnegefälle ein funktionaler Zusammenhang besteht (Rickenmann, 2014).

2.1.2 Empirische Fließgesetze (Potenzgesetze)

Die wohl bekannteste empirische Fließformel stellt der Ansatz nach Strickler (1923) dar. Bei diesem Ansatz handelt es sich um ein Potenzgesetz, welches Ähnlichkeit zur Definition des Darcy-Weisbach Koeffizienten (Gleichung [2]) aufzeigt. Der Strickler-Koeffizient k_{St} [$m^{1/3}/s$] ist nicht dimensionsrein und charakterisiert den Gesamtwiderstand (schließt Korn- und Formrauheit mit ein) (Rickenmann, 2014). Die Stricklerformel wird im Kapitel 2.2 genauer beschrieben.

Für Wildbäche, die typischerweise relativ kleine Abflusstiefen aufweisen, gibt es keine genaueren Angaben zu einer geeigneten Wahl von Werten für die äquivalente Sandrauheit k_s im logarithmischen Fließgesetz. Daher werden typische Strickler-Koeffizienten oft der Literatur entnommen (Rickenmann, 2014).

2.1.3 Variable Power Equation (variables Potenzgesetz)

Die Stricklerformel zeigt im Bereich relativer Abflusstiefen in einem Verhältnis h/d_{84} (Wasserhöhe [m] zu einem Korndurchmesser bei 84% Siebdurchgang [m]) kleiner als 10 einen deutlich veränderten Verlauf als das logarithmische Fließgesetz. Auch einfache logarithmische Fließgesetze können für einen Bereich h/d_{84} kleiner 1 teils sehr geringe bis negative Fließgeschwindigkeiten wiedergeben (Rickenmann, 2014).

Rickenmann und Recking (2011) vergleichen sechs Fließformeln mit Fließgeschwindigkeitsmessungen in Kiesflüssen weltweit und beschreiben aus dem mittleren Trend dieser Daten das variable Potenzgesetz VPE von Ferguson (2007):

$$\frac{V}{v^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{a_1 a_2 (h/d_{84})}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 (h/d_{84})^{5/3}}} \quad [4]$$

Für die Koeffizienten kann dabei $a_1 = 6,5 [-]$ und $a_2 = 2,5 [-]$ angenommen werden (Rickenmann, 2014, Nitsche et al., 2012).

Die Änderung der Fließgeschwindigkeit (V/v^*) mit einer relativen Abflusstiefe (h/d_{84}) zeigt für die VPE-Gleichung (Gleichung [4]) eine höhere Übereinstimmung mit den gemessenen Daten als für die Stricklerformel. Gleichung [4] kann für relative Abflusstiefen h/d_{84} kleiner als 4 folgendermaßen angenähert werden (Rickenmann, 2014):

$$\frac{V}{v^*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 2,2 h/d_{84} \quad [5]$$

Neuere Untersuchungen unterstreichen die Beobachtung, dass sich in steilen und rauen Gerinnen mit $h/d_{84} < 4$ der Fließwiderstand besser durch Gleichung [4] (Ferguson, 2007) annähern lässt (im Vergleich zu Strickler und dem logarithmischem Ansatz für Fließgesetze). Allerdings scheint auch in diesem Gesetz ein von der Gerinnemorphologie abhängiger Rauheitskoeffizient auf, welcher ebenso stark variieren dürfte wie der Stricklerwert. Zusätzlich muss auch bedacht

werden, dass Wildbäche oftmals nicht durch eindimensionale Betrachtungen angenähert werden können, da das Fließverhalten generell stark vom Abfluss beziehungsweise der relativen Abflusstiefe abhängt. Allerdings bedarf es zu vielen dieser Aspekte zukünftig noch detaillierte Untersuchungen (Rickenmann, 2014).

2.2 Rauheitsbeiwerte nach Strickler

Der wohl bekannteste Vertreter unter den Rauheitsbeiwerten im deutschsprachigen Raum ist der Stricklerbeiwert k_{st} .

Das erstmals im 19. Jahrhundert formulierte Fließgesetz basiert auf Gauckler und Manning (Bundesamt für Wasser und Geologie, 2001). Die Rauheitswerte sind unabhängig von der Gewässergröße, aber in ihrer Errechnung abhängig vom Wasserstand (TU Bergakademie Freiberg, 2016). Es gibt mehrere Möglichkeiten zur Ermittlung der Stricklerbeiwerte. Eine Variante stellt die Rückrechnung über die Strickler-Gleichung (Gleichung [7]) dar. Dabei kann aus der aus Messungen abgeleiteten mittleren Fließgeschwindigkeit Rückschluss auf den Stricklerbeiwert gezogen werden. Zumeist ist eine Kalibrierung erforderlich, da bei dieser Methode mit den Rauheitsbeiwerten alle auftretenden Verluste abgebildet werden. Auch gibt es bereits existierende Literaturwerte, die herangezogen werden können. Dabei unterscheidet man zwischen natürlichen Fließgewässern, Vorländern und künstlichen Gerinnen (mit und ohne Auskleidung) (TU Bergakademie Freiberg, 2016). Der Stricklerbeiwert lässt sich auch als der Kehrwert des Manningbeiwerts darstellen (Wikipedia, 2020a):

$$k_{st} = \frac{1}{n} \quad [6]$$

Die Strickler-Formel basiert auf dem Ansatz der Potenzfunktion nach Chezy (Bundesamt für Wasser und Geologie, 2001). Strickler (1924) verwendete als Grundlage eine große Anzahl an Messungen, um die Gültigkeit der bestehenden Formel zu beweisen. Es wurden dabei offene Gerinne und Rohrleitungen mit Messstrecken, die einen großen Variationsbereich von Gefälle, hydraulischem Radius und Rauheit abdecken gewählt (Strickler, 1923). Das Fließgesetz wird in

der Praxis besonders aufgrund seiner Einfachheit oft verwendet (Bundesamt für Wasser und Geologie, 2001). Die Formel lautet:

$$v_m = k_{St} I^{1/2} R^{2/3} \quad [7]$$

v_m steht hier für die mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s], R für den hydraulischen Radius [m] und I für das Energieliniengefälle [-].

Dieses Fließgesetz besagt, dass sich die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m [m/s] (und damit laut Kontinuität auch der Durchfluss) proportional zum Rauheitskoeffizienten k_{St} [$m^{1/3}/s$] verhält. Die Übertragung der Formel ist nicht ganz einfach, da der Rauheitskoeffizient k_{St} dimensionsbehaftet ist. Für die Bestimmung von k_{St} wurde aber im Laufe der Zeit viel an Erfahrungsmaterial zusammengestellt, sowohl für verschiedenste Gerinntypen als auch für unterschiedliche Rauheiten (Bundesamt für Wasser und Geologie, 2001).

2.2.1 Berechnung der Stricklerwerte

Der Stricklerbeiwert k_{St} beschreibt die hydraulische Rauheit des Fließgewässers, wobei ein geringerer Wert rauere und ein höherer Wert glattere Bedingungen beschreibt (TU Bergakademie Freiberg, 2016).

Die hydraulische Rauheit k_s ist das charakteristische Maß für die Rauheit der Sohloberfläche. Diese entspricht dem Durchmesser d_{90} [m] (Korndurchmesser bei 90% Siebdurchgang) (Garbrecht, 1961).

k_s wird normalerweise in Flüssen mit Kiesbett mit dem charakteristischen Korndurchmesser Perzentil der Korngrößenverteilung der Sohle (d_{50} , d_{84} , d_{90}) assoziiert. Die Verwendung eines einzelnen Perzentils zur Repräsentation von k_s kann allerdings aufgrund des Effekts der Verdichtung und dem Vorhandensein von mikroskaligen Sohlformen problematisch sein. Die Rauheit wird durch die Verdichtung effektiv verringert, wohingegen Kieselansammlungen zu einer lokalen Rauheitserhöhung führen. Um diesen Umstand zu verhindern, werden Multiplikatoren zwischen $0,4 \cdot d_{50}$ bis $3,5 \cdot d_{84}$ erforderlich. Ebenso wird die räumliche

Veränderlichkeit in der Oberflächenrauheit selten berücksichtigt. Meist wird ein gemittelter Wert über die gesamte Domäne verwendet (Milan, 2009).

Um den mittleren Korndurchmesser d_{50} [m] auf die hydraulische Rauheit k_s [m] umzurechnen kann folgender Wert nach Thompson and Campbell (1979) verwendet werden:

$$k_s = 4,5 * d_{50} \quad [8]$$

In der folgenden Auflistung wird zwischen verschiedenen Ansätzen zur Berechnung der Stricklerwerte unterschieden.

Meyer-Peter und Müller

Auf Basis von Versuchen im Labor schlugen Meyer-Peter und Müller folgende Beziehung zwischen k_{St} und dem charakteristischen Korndurchmesser der Sohlfläche vor (Umach, 2014):

$$k_{St} = \frac{26}{k_s^{1/6}} \quad [9]$$

Strickler

Die Strickler Gleichung wurde durch verschiedene Versuche entwickelt (Strickler, 1923):

$$k_{St} = 6,7 * \sqrt{g} * \frac{1}{k_s^{1/6}} \quad [10]$$

Wong und Parker

Alternativ zu der bereits erwähnten Beziehung laut Meyer-Peter und Müller, geben Wong and Parker (2006) auf Grundlage der Annahme $k_s = 2*d_{90}$ folgende Gleichung an:

$$k_{St} = \frac{23,2}{d_{90}^{1/6}} \quad [11]$$

Auch hier muss aufgrund des Nichtvorhandenseins von d_{90} alternativ mit $k_s = 2 \cdot 4,5 \cdot d_{50}$ gerechnet werden. Für d_{90} wird also in diesem Fall $d_{90} = 0,5 \cdot 4,5 \cdot d_{50}$ eingesetzt.

Schöberl

Schöberl (1981) schlug einen Wert für die Beziehung zwischen Sohlrauheit und charakteristischem Korndurchmesser vor. Auch diese Formel unterscheidet sich nur in einem Wert von den anderen:

$$k_{St} = \frac{23,5}{k_s^{1/6}} \quad [12]$$

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK)

Eine von Strickler empfohlene Formel aus dem DVWK (1990) bezieht sich auf geschiebeführende Gebirgsflüsse und verwendet den mittleren Korndurchmesser der Geschiebesieblinie und lautet:

$$k_{St} = \frac{21}{d_{50}^{1/6}} \quad [13]$$

Manning-Strickler

Die Manning-Strickler-Gleichung ist eine empirische Beziehung, die aus den Kies-Flussbettdaten entwickelt wurde. Auch hier muss d_{50} in mm eingesetzt werden (Milhous, 2015):

$$k_{St} = \frac{1}{0,0131 * (d_{50})^{1/6}} \quad [14]$$

Absolut deviation relation (LAD)

Die absolute Abweichungsrelation (LAD) errechnet die erwarteten Manning Rauheiten für die mittlere Korngröße des Bettmaterials. Die Korngröße d_{50} muss dabei in mm eingesetzt werden (Milhous, 2015).

$$k_{St} = \frac{1}{0,0087 * (d_{50})^{0,5}} \quad [15]$$

20% Quantil

Eine weitere Gleichung zur Berechnung der Strickler-Rauheit ist über die 20%-Quantil-Gleichung. Die Korngröße d_{50} muss hier ebenfalls in mm eingesetzt werden (Milhous, 2015).

$$k_{st} = \frac{1}{0,0077 * (d_{50})^{0,43}} \quad [16]$$

Die angegebenen Gleichungen [9] bis [16] wurden durch Experimente entwickelt und sollen als grobe Schätzung verstanden werden (Milhous, 2015, TU Bergakademie Freiberg, 2016).

Diese Formeln für die Berechnung der Stricklerwerte beziehen sich im Grunde aber nur auf den Fall der ebenen Sohle, welche in kiesführenden Flüssen oft maßgeblich ist (Bundesamt für Wasser und Geologie, 2001). Für diese Arbeit wurde grundsätzlich davon ausgegangen, dass sich die Korngrößenverteilungen zwischen Ufer- beziehungsweise Bankbereichen nur geringfügig von jenen der Sohle unterscheiden. Die k_{st} -Werte der Ufer könnten zum Beispiel mit der Hilfe einer Zusammenstellung von Richtwerten nach Schröder (1990) gesondert geschätzt werden.

2.2.2 Literaturwerte

Prinzipiell gibt es viele verschiedene Angaben von Stricklerwerten für unterschiedliche Berandungen in der Literatur (TU Bergakademie Freiberg, 2016). Zum späteren Vergleich mit den schlussendlich errechneten Rauheiten sollen folgende Werte aus Tabelle 1 als Richtwert angenommen werden. (TU Bergaka-

Tabelle 1: Rauheiten für natürliche Fließgewässer (TU Bergakademie Freiberg, 2016)

Art des Fließgewässers	k_{St} [$m^{1/3}/s$]
Flachlandflüsse mit einer Abflussbreite bei Hochwasser < 30 m:	
Gerader Verlauf, kleine Gräben, keine Untiefen	30 – 40
Mäandrierend, einige Mulden und Untiefen	22 – 30
Mit Stillwasserbereichen, verkrautet, tiefe Mulden	13 – 20
Sehr verkrautet, Vorländer mit vielen Bäumen/Unterholz	ca. 10
Gebirgsflüsse, Flussbett unbewachsen, steile Böschungen, bewachsene Ufer	
Gewässergrund kiesig, Steinbrocken, einzelne Felsblöcke	20 – 35
Rauer Gewässergrund mit Steinbrocken und Felsblöcken	15 – 25
Felsenmeer	ca. 10

demie Freiberg, 2016)

Zusätzlich ist der untenstehenden Tabelle 2 zu entnehmen, dass die k_{St} -Werte für Kies auch zwischen 40 und 50 liegen können.

Tabelle 2: k_{St} -Werte für Kies (Landesanstalt für Umweltschutz and Baden-Württemberg, 2003)

Gerinne		k_{St} [$m^{1/3}/s$]	k_s [m]
Erdkanäle	stärker bewachsen	32,5 - 34,5	0,19 - 0,27
	stark verkrautet	24,5 - 29	0,5 - 0,15
	kurzes Gras, etwas Kraut	30 - 45,5	
Vorländer	mitteldichtes Gestrüpp	6 - 22	
	dichte Weiden	5 - 9	
Kies und Steine	Grobkies	42,5 - 43	0,05 - 0,054
	Sand und Kies bis 60 mm	42 - 50	0,02 - 0,055
	mittlerer Kies	40	

2.3 Rauheiten-Bestimmung mittels terrestrischem Laserscan

Pollyea and Fairley (2011) beschreiben in ihrem Ansatz zur Rauheitsberechnung mittels terrestrischem Laserscan eine Methode, bei der in die gemessene Punktwolke eine Ebene hineingelegt wird, zu welcher dann die orthogonalen Abstände berechnet werden. Die Ebene kann dabei durch die orthogonale Abstandsregression (ODR orthogonal distance regression) oder die Regression der kleinsten Quadrate (OLS ordinary least squares) eingepasst werden (Pollyea and Fairley, 2011).

Das grundlegende Prinzip der Idee liegt darin, dass die Oberflächenrauheit über die orthogonale Abstandsregression aus den Scandaten des terrestrischen Laserscannings ermittelt werden soll. Dazu werden aus der Punktwolke die Abschnitte, welche betrachtet werden sollen, herausgeschnitten. Innerhalb dieser Abschnitte wird dann eine lokale Referenzebene mit orthogonaler Abstandsregression erstellt und hineingelegt. Zusätzlich werden die orthogonalen Abstände von jedem Punkt zur Ebene errechnet (Pollyea and Fairley, 2011).

Diese Ebene kann mit der Standard-Ebenengleichung beschrieben werden (Pollyea and Fairley, 2011):

$$z = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y \quad [17]$$

Dabei sind x, y, z die Koordinaten und $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ die Ebenenkoeffizienten (Pollyea and Fairley, 2011).

Markovsky und VanHuffel (2007) geben Informationen über die ODR Methode (orthogonal distance regression) und zeigen eine analytische Beschreibung für die orthogonale Abstandsregression:

$$\beta = (X^T X - \sigma^2 I)^{-1} X^T z \quad [18]$$

β beschreibt hier den Ebenenvektor, X die Designmatrix, z beschreibt die z -Koordinaten, I die Identitätsmatrix und σ ist der kleinste singuläre Wert der erweiterten Matrix (Pollyea and Fairley, 2011).

Nach der Festlegung der Ebenenkoeffizienten müssen nun die orthogonalen Abstände der einzelnen Punkte zur Ebene berechnet werden. Dazu müssen alle Punkte so verändert werden, dass jeder Messwert sich auf denselben Ursprung in der Regressionsebene bezieht (Pollyea and Fairley, 2011).

Die Berechnung der orthogonalen Abstände erfolgt über das positive Produkt aus dem Messpunktvektor multipliziert mit dem Einheitsvektor. Dazu muss vorerst die Skalar-Projektion des angepassten Messpunktvektors auf den Ebenen-Normalvektor errechnet werden, welcher dann auf eine einheitliche Länge skaliert wird (Pollyea and Fairley, 2011).

$$D_i = |\mathbf{n}_u * \mathbf{v}_i|, \quad i = 1, \dots, N \quad [19]$$

D_i ist hier der orthogonale Abstand, n_u ist der Einheits-Normalvektor der Regressionsebene und v_i ist der Messpunktvektor (Pollyea and Fairley, 2011).

Im Unterschied zur orthogonalen Regression, baut die Regression der kleinsten Quadrate (OLS) auf der Annahme auf, dass alle Abweichungen durch eine abhängige Variable beschrieben werden. Alle anderen unabhängigen Variablen können daher als fehlerfrei betrachtet werden. Mit diesem Algorithmus wird die Regressionsebene daher an die minimalen Punkt-zu-Ebene-Abstände (in eine Richtung) angepasst. Die Oberflächenrauheit wird im Anschluss als die Standardabweichung(θ) der orthogonalen Abstände kalkuliert (Pollyea and Fairley, 2011).

$$\theta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2} \quad [20]$$

Mit Hilfe des Algorithmus basierend auf der Regression der kleinsten Quadrate werden Basisoberflächenlinien für alle Teildaten angegeben. Im Unterschied dazu gibt der Algorithmus der orthogonalen Abstandsregression die Ebene an, welche unabhängig von der Achsorientierung am besten an die minimalen Punkt-zu-Ebene-Abstände angepasst ist. Damit ergeben sich im Vergleich zur Methode

über die orthogonale Abstandsregression höhere Werte (Pollyea and Fairley, 2011).

Eine alternative Darstellung des k_s -Werts ist es, die Sohloberfläche als zufälliges Feld von Oberflächen-Höhenkoordinaten zu behandeln (Milan, 2009).

$$Z(x, y, t) \quad [21]$$

Wobei z für die Höhenkoordinate, x und y für Längs- und Transversalkoordinaten und t für die Zeit steht.

Durch das bisherige Fehlen von hochauflösenden topografischen Daten, konnte diese Methode bis jetzt nicht mit Erfolg gekrönt werden. Durch die moderne fotografische und Laserscanning-Technologie wird eine verbesserte Datenerfassung ermöglicht. Der Vorteil der digitalen Photogrammetrie liegt in der Millimeter-Genauigkeit des digitalen Modells, solange die Oberfläche trocken ist (Milan, 2009).

Milan (2009) beschreibt eine Methode, bei der die lokale Standardabweichung (σ_z) einer Teilfläche der Rohdaten-Punktwolke errechnet und verdoppelt wird ($2 \cdot \sigma_z$). Die Multiplikation mit dem Faktor zwei folgt einer Empfehlung von Gomez (1993). Im Anschluss werden dann vier weitere Geländemodelle der doppelten Standardabweichung mit verschiedenen Gitterauflösungen erstellt, um die Oberflächenrauheit zu charakterisieren (Milan, 2009).

Der terrestrische Laserscan eröffnet neue Möglichkeiten, um die Quantifizierung der Rauheitsparameter zu verbessern. Ebenso können dadurch globale Korngrößen beschrieben und diese Werte als Input für hydraulische Modelle verwendet werden, um so die Fließgeschwindigkeit vorherzusagen. Aber auch der Laserscan stößt irgendwo an seine Grenzen. Die Funktionalität der Laserscans ist nur bei trockenen Flächen gegeben, da die kürzeren Wellenlängen des Lichts von der Wasseroberfläche reflektiert werden (Milan, 2009). In Zukunft könnte dieses Problem durch LiDAR-Systeme (light detection and ranging) gelöst werden (Brock et al., 2007). LiDAR ist ein Laser-basiertes Messinstrument zur Abbildung der Umwelt (Blickfeld, 2020). Dieses ermöglicht es ebenso, größere Flächen im Vergleich zum Laserscan zu vermessen. Nichtsdestotrotz, ermöglicht Laserscanning höhere Auflösungen und bessere vertikale Genauigkeit. Zusätzlich sind die

Kosten und die Nachbearbeitung im Vergleich zur Photogrammetrie erheblich reduziert (Milan, 2009).

Es ist erforderlich, die Punktwolken vor der Weiterverwendung zu bearbeiten, da nur eine begrenzte Anzahl an Datenpunkten verarbeitet werden kann. Trotzdem zeigt das Laserscanning hohes Potential für die Verwendung in Flüssen mit Kiesbetten (Milan, 2009).

Mit Hilfe der Roughness-Length-Mehod können die Laserscandaten auch zur Rauheitscharakteristik von Gesteinsmassendiskontinuitäten verwendet werden (Rahman et al., 2006).

3. Methodik

3.1 Grundlage

Ziel ist es, einen einfachen Algorithmus zu entwickeln, der es ermöglicht, die verschiedenen, gemessenen Oberflächenparameter in eine äquivalente Sandkornrauheit beziehungsweise Rauheitsbeiwerte umzuwandeln.

Aufbauend auf dem Prinzip nach Pollyea and Fairley (2011) wird die Oberflächenrauheit auch hier bestimmt, indem eine Ebene in die Punktwolke eingepasst wird, zu welcher dann die orthogonalen Abstände errechnet werden. Anders als bei Pollyea and Fairley (2011) wird die Rauheit dann aber nach Adams et al (2012) als arithmetischer beziehungsweise quadratischer Mittelwert der orthogonalen Abstände ausgegeben.

Die Ebene kann über die Standard-Ebenen-Gleichung beschrieben werden (Ben, 2020):

$$z = ax + by + c \quad [22]$$

Dabei zeigen x, y, z die Koordinaten [m] und a, b, c die Ebenenkoeffizienten [-].

Zur einfacheren Handhabung sollen die Daten in Matrixschreibweise angeführt werden, was zu folgendem Ausdruck für die Ebenengleichung führt (Ben, 2020):

$$B = Ax \quad [23]$$

Wobei x hier die Koeffizienten verkörpert.

Im Anschluss solle nun die Ebene bestimmt werden, die die vertikalen Abstände minimiert. Nachdem das System überbestimmt ist muss zur Lösung der Gleichungen die Formel der Pseudo-Inversen nach Ben (2020) verwendet werden:

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T B \quad [24]$$

A^+ beschreibt den Ebenenvektor, A die Designmatrix, B beschreibt die z-Koordinaten.

Nach der Festlegung der Ebenenkoeffizienten müssen nun die orthogonalen Abstände der einzelnen Punkte zur Ebene berechnet werden. Dazu müssen alle Punkte so verändert werden, dass jeder Messwert sich auf denselben Ursprung in der Regressionsebene bezieht (Pollyea and Fairley, 2011). Vereinfacht gesagt wird in eine unebene Oberflächenmessung eine Ebene hineingelegt (siehe Abbildung 1), zu der dann jeweils die orthogonalen Abstände berechnet werden (Adams et al., 2012).

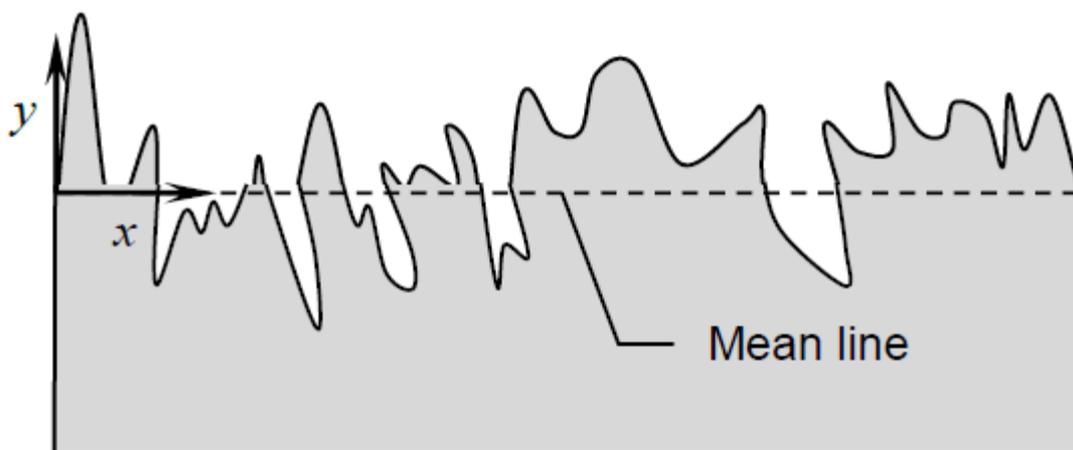


Abbildung 1: Raue Oberfläche eines willkürlichen Profils (Adams et al., 2012)

Nachdem alle Abstände errechnet wurden, wird die Oberflächenrauheit einerseits über das arithmetische Mittel (R_a) und andererseits über das quadratische Mittel (R_{rms}) kalkuliert. Die Unterteilung in zwei Parameter erfolgt, um zwei verschiedene Arten der Auswertung vergleichen zu können.

Arithmetisches Mittel (R_a) (Adams et al., 2012):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad [25]$$

Quadratische Mittel (R_{rms} , steht für Root Square Mean) (Adams et al., 2012):

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad [26]$$

Wobei y_i hier für den orthogonalen Abstand [m] zu der mittleren Profilhöhe der Messung steht. n zeigt die Anzahl der Messungen.

Für den Fall einer Monoschicht mit einer gleichmäßigen Anordnung von Kugeln, ergibt sich so eine einheitliche Reihe von Halbkugeln (Abbildung 2). Der Durchmesser dieser Halbkugeln kann dann mathematisch über die Integralrechnung bestimmt werden (Adams et al., 2012).

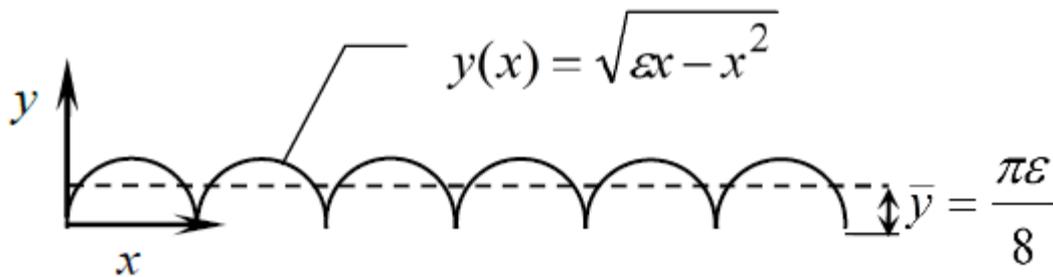


Abbildung 2: Gleichmäßige Reihe von Halbkugeln (Adams et al., 2012)

Für die Kugeldurchmesser (ϵ) ergibt sich nach der mathematischen Herleitung laut Adams et al. (2012):

$$R_a = \frac{1}{\epsilon} \int_{x=0}^{\epsilon} |y - \bar{y}| dx \quad [27]$$

$$y(x) = \sqrt{\epsilon x - x^2} \quad [28]$$

$$\bar{y} = \frac{\pi \epsilon}{8} \quad [29]$$

Nach der Substituierung und der Integration folgt (Adams et al., 2012):

$$R_a = \frac{\varepsilon}{2} \left[\frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left(1 - \frac{\pi^2}{16} \right)^{1/2} - \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{\pi^2}{16} \right)^{1/2} \right] \quad [30]$$

Aus den beschriebenen Rechenschritten ergibt sich schlussendlich nach Adams et al. (2012) folgender Ausdruck für den Durchmesser von Kugeln (ε) zu:

$$\varepsilon = 11,03 * R_a \quad [31]$$

Der Umrechnungsfaktor für Kugeln mit dem quadratischen Mittelwert R_{rms} errechnet sich aus dem Mittelwert der Verhältnisse von R_{rms} zum gemessenen Durchmesser.

Mit den errechneten Mittelwerten (R_a und R_{rms}) können nun verschiedene Betrachtungen angestellt werden. Die Mittelwerte lassen sich auf die jeweiligen mittleren Korndurchmesser umlegen, welche dann mit den Korndurchmessern der beiden anderen Methoden (Kapitel 3.3) verglichen werden können.

Zum einen können die errechneten mittleren Korndurchmesser dann als Grundlage für eine Konvergenzstudie dienen, um den Einfluss der Anzahl der Laserscan-Standpunkte zu eruieren. Zum anderen können verschiedene Annahmen in der Python-implementierten Software verglichen und getestet werden. Dabei kann die Anwendung eines Filters versucht und mit den Ergebnissen ohne Filter verglichen werden. Zusätzlich ist es möglich, den Einfluss der Größe der betrachteten Flächen zu untersuchen, indem die ursprünglichen Auswertungsflächen von ungefähr einem Quadratmeter auf circa 20 cm mal 20 cm eingeschränkt werden.

Ebenso können die Abweichungen zwischen den mittels Python errechneten Korndurchmessern und jenen aus der Basegrain-Auswertung (siehe beide in Tabelle 13) als absolute und relative Differenzen dargestellt werden (Kapitel 4.4.3). Dabei wird die absolute Differenz gebildet, indem man die jeweiligen Korndurchmesser aus der Basegrain-Auswertung und der Python-implementierten Software voneinander subtrahiert. Bezieht man diese absoluten Differenzwerte dann

nochmals auf die Basegrain-Korngrößen, erhält man die relativen Differenzen, welche die Abweichungen als Prozentsatz wiedergeben.

Um den Zusammenhang der Variablen innerhalb der Python-implementierten Software zu verdeutlichen, kann eine Regressionsanalyse durchgeführt werden. Dabei werden die beiden zu betrachtenden Variablen (Korngrößen aus Basegrain und der Python-implementierten Software) jeweils als horizontale beziehungsweise vertikale Koordinate von Punkten in einem Diagramm aufgetragen. In dieses Diagramm wird dann eine Linie gelegt, welche sich durch Regression an die Punkte anpasst. Je näher alle Punkte an der Geraden sind, desto besser ist der Zusammenhang und desto höher der ausgegebene Wert der Regression.

Nicht zuletzt geht es aber darum, aus den berechneten mittleren Korndurchmessern auf die Rauheiten (in dieser Arbeit in Stricklerrauheiten) umzurechnen und mit bereits vorhandenen Literaturwerten zu vergleichen. Dazu kann auch die äquivalente Rauheit k_s aus den Korndurchmessern der Python-implementierten Software mit den entsprechenden Werten aus der Basegrainanalyse verglichen werden.

3.2 Python Auswertungsmethode

Die maßgebliche Auswertungsmethode in dieser Arbeit umfasst die Auswertung mittels eines institutsinternen Python-Programms. Dieses Programm wertet die Daten aus, die mittels Laserscan gemessen wurden, und errechnet schlussendlich die Korngrößen beziehungsweise daraus die Stricklerauheiten.

3.2.1 Laserscanner

Zur Messung wurde ein Laserscangerät namens RTC360 von Leica Geosystems verwendet. Dieses Gerät ermöglicht die Erfassung und Dokumentation der Umgebung in 3D mittels schneller, einfacher, präziser und tragbarer Hard- und Software. Die 3D-Umgebungserfassungslösung RTC360 umfasst neben dem 3D-Laserscanner auch die mobilen App Leica „Cyclone FIELD 3D“ für das Edge-Computing zur automatischen Echtzeit-Scanregistrierung, welches in unserem Fall auf einem Tablet installiert wurde (Abbildung 3), und die Bürosoftware Leica „Cyclone REGISTER 360“, um das 3D-Modell zu importieren (Leica Geosystems, 2020).

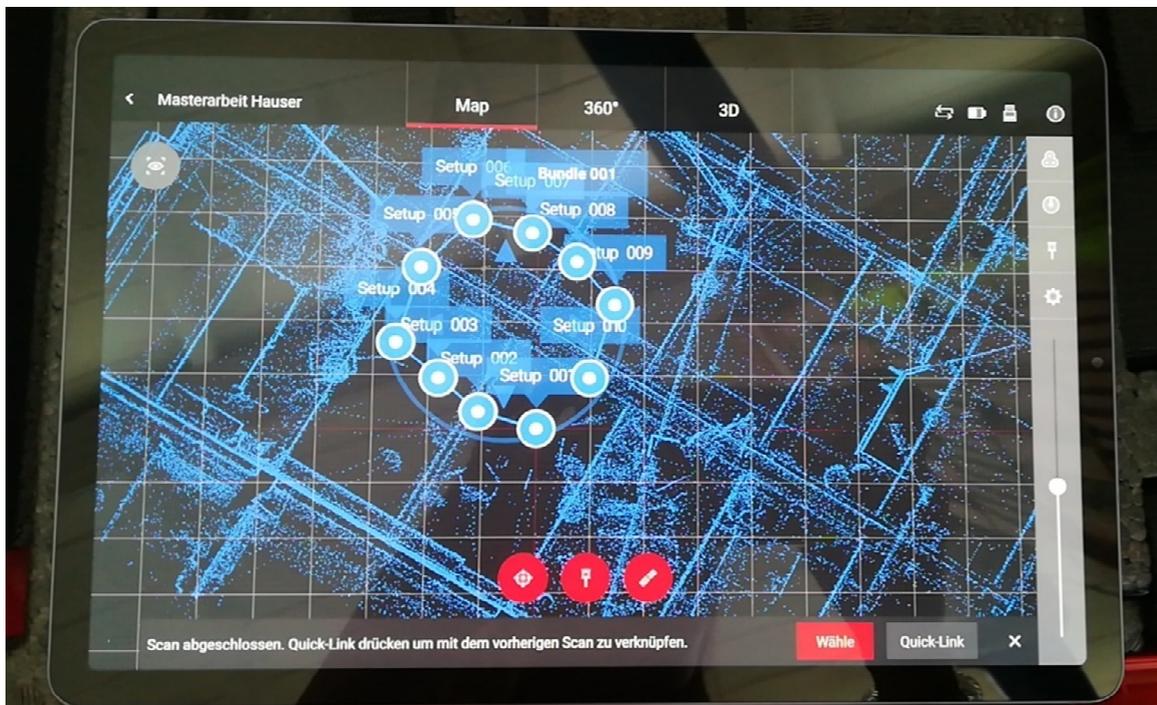


Abbildung 3: App Leica Cyclone FIELD 3D

Das Scangerät (Abbildung 4) benötigt für die Erfassung der Umgebung als Scandaten inklusive HDR-Aufnahmen (Fotos) weniger als zwei Minuten (Leica Geosystems, 2020). In diesem Fall wurde eine Einstellung gewählt, um bewegte Punkte zu eliminieren. Dabei erfasst der Scanner seine Umgebung zweimal hintereinander und filtert so alle Punkte heraus, die sich nicht in beiden Scans an derselben Stelle befinden. Mit dieser Einstellung benötigt das Gerät circa vier Minuten zur Vermessung. Ebenso kalibriert und horizontiert sich das Gerät selbst und über die Einstellungen kann zwischen hoher, niedriger und mittlerer Feinheit des Resultats unterschieden werden.



Abbildung 4: Leica RTC360 (Leica Geosystems, 2020)

3.2.2 Auslesen der Laserdaten

Dazu muss im ersten Schritt nach der Messung das Übertragen der Messwerte auf den Computer erfolgen. Dies geschieht mit dem zum Scanner gehörenden Programm „Cyclone REGISTER 360“. Dabei werden alle Punkte vom Gerät auf den Computer beziehungsweise in die Software importiert, um dann weiterverarbeitet zu werden. Dabei empfiehlt sich ein Rechner mit hoher Leistung, da die Übertragung mehrere Stunden dauern kann (Hier wurde der Rechner „Dell Precision 5820 Tower XCTO Base“ mit Intel® Core™ i9-10900X 3,7GHz, 64GB 2.666 MHz verwendet. Damit dauerte die Übertragung circa zwei Stunden pro Scandatei mit zwei bis fünf Standpunkten.). Nachdem alle Punktwolken importiert wurden, können die Daten mit dem Programm „Cyclone 3DRESHAPER“ nachbearbeitet werden. Die zugeschnittenen Punktwolken können dann als .asc-Datei

exportiert werden. Mit dem Programm „CloudCompare“ (CloudCompare, 2020) können dann einzelne Wolken übereinandergelegt und verbunden werden. Auch empfiehlt es sich, etwaige Punkte, die höhenmäßig nicht hineinpassen, mit diesem Programm händisch herauszuschneiden. Nachdem die Daten dann als .txt-Datei ausgegeben wurden, sind sie bereit, um in die Python-basierte Software eingelesen zu werden.

3.2.3 Implementierung in Python

Die ausgelesenen, bearbeiteten und zugeschnittenen Daten werden nun in die Python-basierte Software eingelesen. Ebenso werden über Koordinaten die vier Eckpunkte des auszuwertenden Bereichs als Polygon definiert. Über eine Funktion werden im ersten Schritt alle Punkte aussortiert, die nicht innerhalb dieses definierten Polygons liegen. Im weiteren Verlauf des Programms wird eine Ebene definiert und mittig in die Punktwolke innerhalb des Polygons gelegt. Im Anschluss werden die orthogonalen Abstände jedes Punktes zu dieser Ebene errechnet. Zusätzlich kommt hier auch ein Filter vor, der höhenmäßige Ausreißer aussortieren soll (Im Laufe der Untersuchung stellte sich allerdings heraus, dass mit den Rohdaten bessere Ergebnisse erzielt werden können). Mit den vorhandenen Daten kann nun das arithmetische Mittel (R_a) und das quadratische Mittel (R_{rms}) aus den orthogonalen Abständen berechnet werden. Daraus können dann die jeweiligen Stricklerwerte (nach den verschiedenen Ansätzen laut Kapitel 2.2.1) kalkuliert werden. Zum Schluss wird die ausgewählte Punktwolke inklusive der hineingelegten Ebene grafisch dargestellt (Abbildung 5).

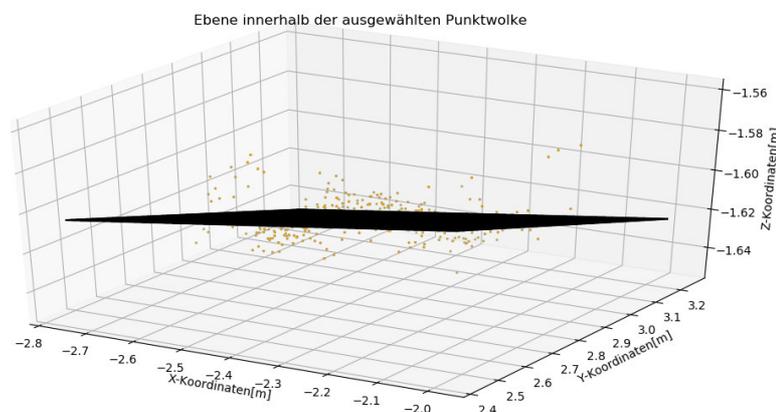


Abbildung 5: Grafische Darstellung der Ebene in Python

Der Code der Implementierung lässt sich dem Anhang entnehmen (Kapitel 9.1).

Ablaufdiagramm des Codes für Naturmessungen (Abbildung 6):

Der Ablauf für Labormessungen unterscheidet sich nur geringfügig darin, dass im letzten Schritt nicht die Stricklerwerte sondern die Kugeldurchmesser berechnet werden.

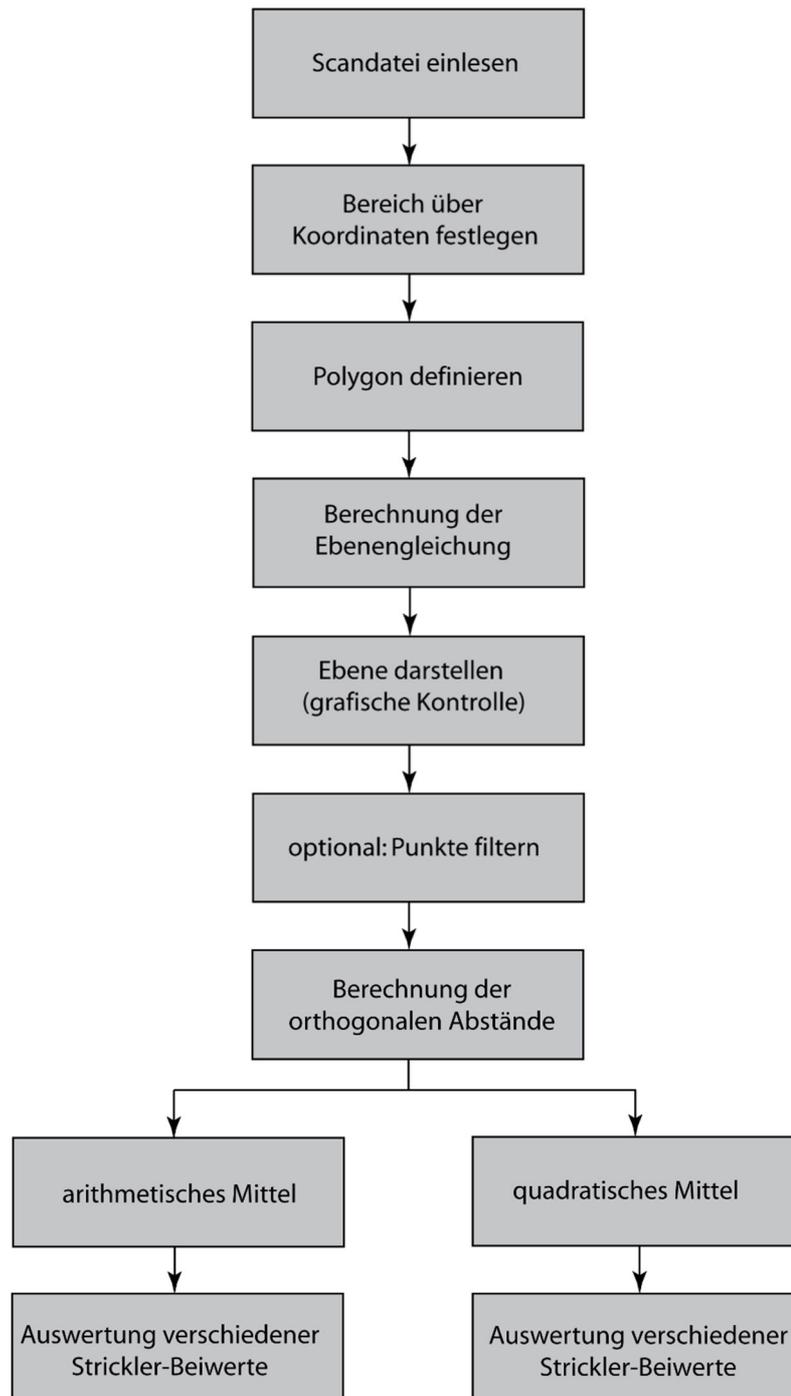


Abbildung 6: Ablaufdiagramm des Codes

3.3 Vergleichsauswertungsmethoden

Im Allgemeinen wurden zur Auswertung der Korndurchmesser im Rahmen dieser Arbeit drei verschiedene Verfahren verwendet. Diese werden im Folgenden näher erläutert. Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass auch eine Auswertung mit der Software ImageJ angedacht war. Diese wurde allerdings nach mehrmaligen Versuchen als ungeeignet eingestuft, da die Software auf den biologisch-medizinischen Bereich ausgelegt ist und für die Auswertung der Bilder, die in der freien Natur mit mehreren Störfaktoren aufgenommen wurden, zu unzureichenden Ergebnissen führte.

3.3.1 Siebanalyse

Eine der drei verwendeten Auswertungsmethoden stellte die Siebanalyse nach DIN 18123 (2011) dar. Diese Methode wird in der Praxis auch verwendet als Grundlage für die Bestimmung von Wasserdurchlässigkeit, Frostempfindlichkeit, Erosionsempfindlichkeit und Tragfähigkeit des Bodens. Das Ziel der Analyse liegt darin, für die unterschiedlichen Korngrößenfraktionen Ton, Schluff, Sand, Kies und Steine einer Probe jeweils den prozentuellen Massenanteil zu bestimmen. Im Fall dieser Masterarbeit lag das Hauptaugenmerk auf der Bestimmung des mittleren Korndurchmessers d_{50} (ifMU, 2020).

Korngrößen über 0,063mm (Steine, Sand und Kies) können über eine Siebung in die einzelnen Korngruppen getrennt werden. Besteht der Boden ausschließlich aus Korngrößen über 0,063mm, so kann eine Trockensiebung angewendet werden. Wenn die vorhandene Bodenprobe auch Korngrößen unter 0,063mm (Schluff und Ton) enthält, muss eine Siebung nach nassem Abtrennen der Feinteile durchgeführt werden. Im Anschluss an die Siebung werden die Rückstände in den Sieben gewogen und deren Massen mit der Gesamttrockenmasse ins Verhältnis gesetzt, um die Korngrößenverteilung zu erhalten (ifMU, 2020).

Durchführung der Siebanalyse

Für eine Siebanalyse müssen mehrere Prüfsiebe übereinander angeordnet werden und in einem sogenannten Siebturm (siehe Abbildung 7) eingespannt werden. Die Maschenweite der Siebe variiert und ist von oben nach unten absteigend. Die zu analysierende Probe wird auf das größte Prüfsieb gegeben und über eine definierte Zeit gerüttelt. Im Anschluss werden die Rückstände der einzelnen Siebe gewogen und damit die Korngrößenverteilung der jeweiligen Probe ermittelt. Die Siebung ermöglicht eine Charakterisierungen im Bereich von 20µm bis zu mehreren Zentimetern (ifMU, 2020).



Abbildung 7: Siebturm (ifMU, 2020)

Bei dieser Arbeit wurde die Siebanalyse zu Vergleichszwecken verwendet. Da die beiden anderen Auswertungsmethoden die Genauigkeit bereits einschränken, konnte hier auf eine zusätzliche Schlämmanalyse verzichtet werden.

Es wurden drei verschiedene Proben aus Schotterbänken im Projektgebiet (siehe Kapitel 3.4.2) entnommen und im Labor für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz ausgewertet. Dazu wurde jede Probe jeweils zuerst nass 15 Minuten lang gesiebt, anschließend im Trockenofen getrocknet, um dann wiederum händisch trocken gesiebt zu werden. Während der Trockensiebung wurden die einzelnen Siebrückstände gewogen und in einer Liste vermerkt. Diese Gewichtsanteile wurden anschließend zur automatisierten Ermittlung der Korngrößenverteilung und der Sieblinie verwendet.

3.3.2 *Fotosiebung*

Die Software Basegrain wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich entwickelt. Basegrain ist eine MATLAB-basierte Software, die imstande ist, automatisiert Objekte zu erfassen. Diese Software kann verwendet werden, um anhand von Fotografien, welche Flusskiesbetten in der Draufsicht zeigen, eine Korngrößenanalyse durchzuführen (ETH Zürich, 2020).

Das Programm funktioniert über ein grafisches Nutzerinterface (GUI... graphical user interface), welches sowohl eine Vor- als auch eine Nachbearbeitung möglich macht. Nach der Linien-Stichprobenanalyse laut Fehr (1987) kann eine Korngrößenverteilung errechnet und deren Ergebnisse als Excel- oder GIS-Format ausgelesen werden (ETH Zürich, 2020).

Vorgangsweise zur Auswertung mittels Basegrain

1) Am Anfang muss das Foto in das Programm geladen werden. Dieses sollte am besten mit möglichst wenigen Störfaktoren wie Schatten oder Gras aufgenommen werden und muss einen Maßstab inkludieren (Abbildung 8).

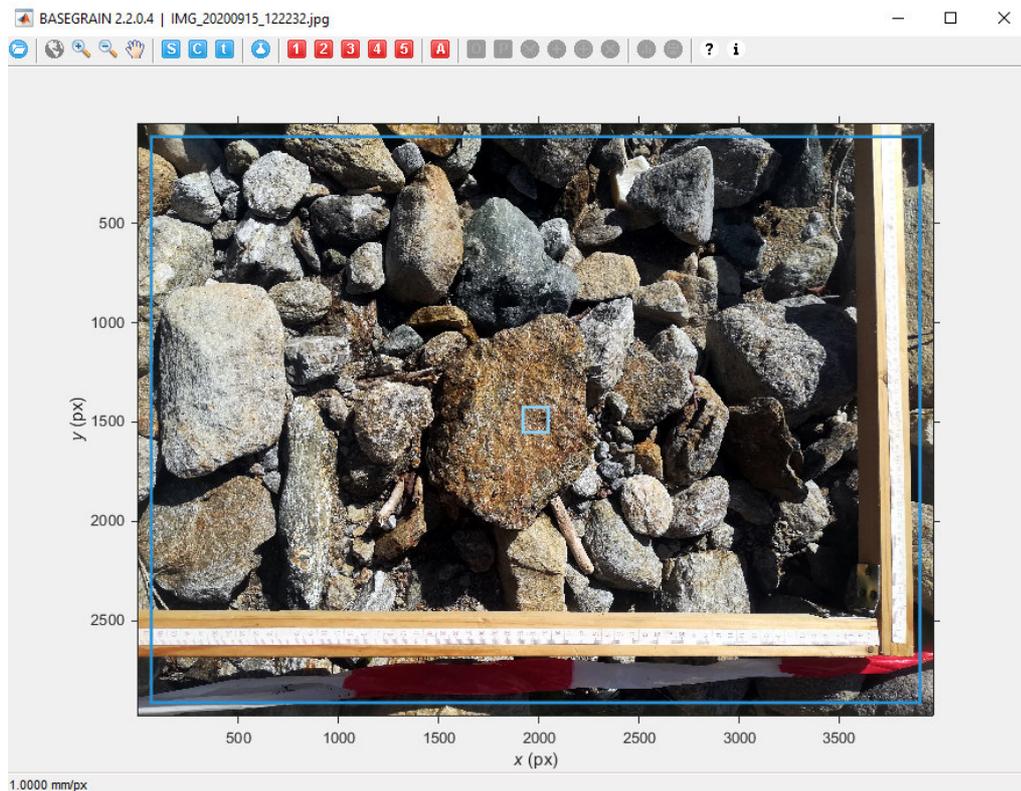


Abbildung 8: Programmansicht Fotosiebung mittels Basegrain (ETH Zürich, 2014)

2) Mit Hilfe dieses Maßstabs kann nun eine Skalierung des Fotos durchgeführt werden. Dazu klickt man auf „S“ (Abbildung 9) und markiert mit einer Linie einen bestimmten Abstand auf dem Maßstab, welcher dann eingetragen und vom System zur automatischen Errechnung der Skalierung verwendet wird.



Abbildung 9: Bedienleiste Basegrain: Befehl Skalierung (ETH Zürich, 2014)

3) Im dritten Schritt wird mit dem Befehl „C“ zuerst der Bereich definiert, der ausgewertet werden soll und innerhalb dieses Bereichs wird ein weiterer, kleinerer Bereich mit dem Befehl „t“ ausgewählt, der als Referenzbereich zur Auswertung verwendet wird (Abbildung 10).

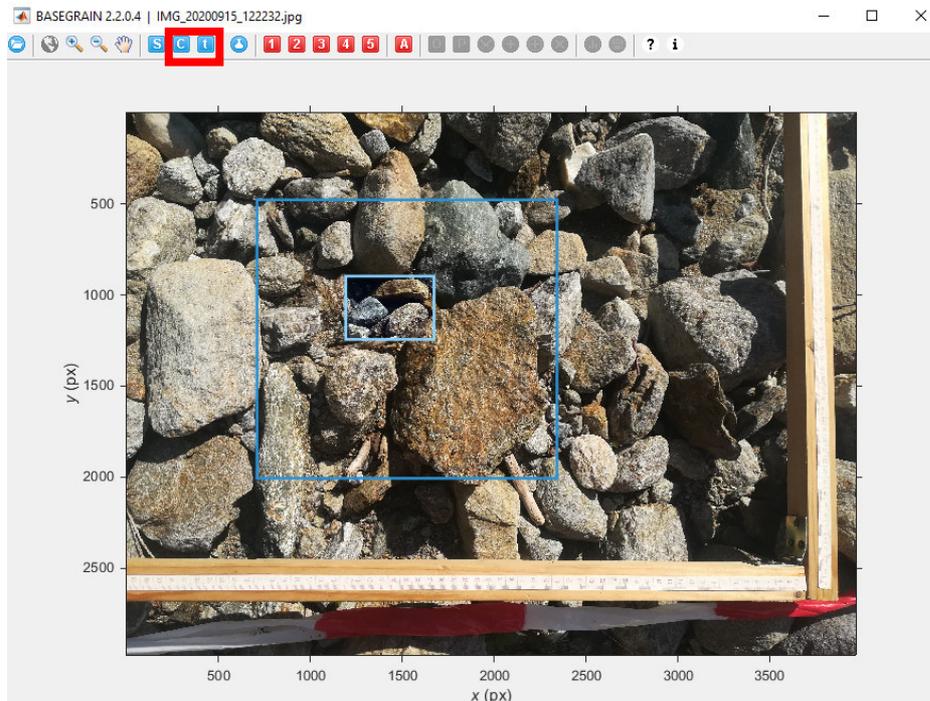


Abbildung 10: Basegrain: Befehl Bereichsauswahl (ETH Zürich, 2014)

4) Weiters wird dann mit dem Befehl „A“ die Analyse durchgeführt (Abbildung 11).



Abbildung 11: Bedienleiste Basegrain: Befehl Analyse (ETH Zürich, 2014)

5) Nach erfolgreicher Kalkulation durch die Software werden die Umrandungen der einzelnen Körner angezeigt. Diese können beziehungsweise müssen dann noch händisch nachbearbeitet werden (siehe Abbildung 12).

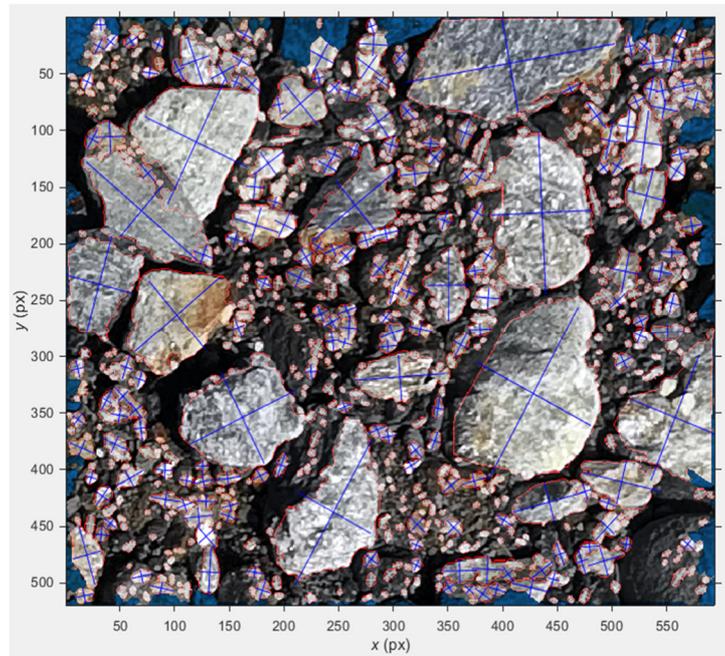


Abbildung 12: Symbolbild Nachbearbeitung in BASEGRAIN (ETH Zürich, 2014)

6) Nachdem die Nachbearbeitung durchgeführt wurde, kann man die Ergebnisse der Korngrößenverteilung grafisch ausgeben (Abbildung 13). Dabei kann man aus verschiedenen Darstellungen wählen (logarithmische/normale Achsenskalierung).

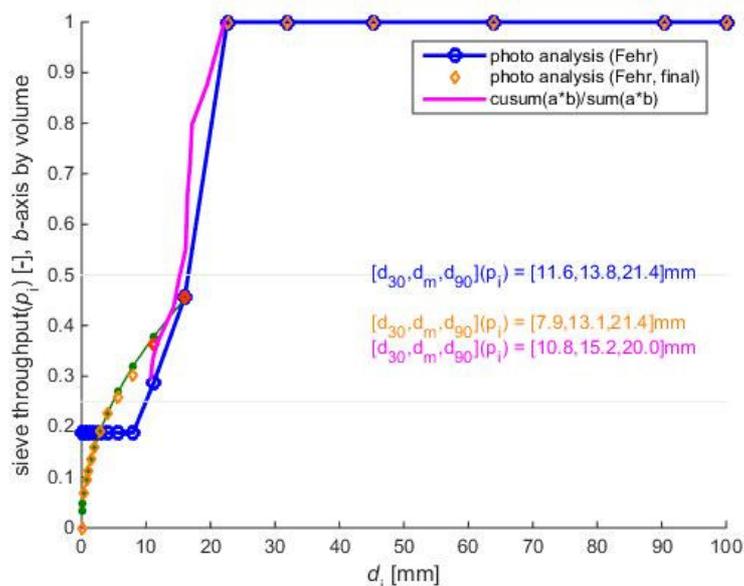


Abbildung 13: Symbolbild Grafische Auswertung BASEGRAIN (ETH Zürich, 2014)

3.4 Messungen

Die Technologie des Laserscannings entwickelt sich stetig weiter und daher ist es sinnvoll diese Methode für die Rauheitsbestimmung zu adaptieren. Basierend auf den Recherchen (in Kapitel 2.3) wurde eine Idee entwickelt, auf der die Umsetzung der Rauheitsbestimmung mittels Laserscan im Wesentlichen aufbaut.

3.4.1 Laborversuch

Auf Grundlage der in Kapitel 3.1 beschriebenen Überlegungen wurde zuerst versucht, diese Messung im Labor zu umzusetzen. Damit sollten Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie sehr die gemessenen Ergebnisse vom mathematischen Ansatz für Kugeln abweichen.

Dazu wurden drei Platten von je circa einem Quadratmeter mit Kugeln in drei verschiedenen Größen beklebt (Abbildung 14). Diese Platten wurden anschließend im Labor mit dem Laser aus acht verschiedenen Standpunkten rund um die Platten eingescannt. Mit dem zuvor entwickelten Python Skript wurden die ausgelesenen Datenpunkte dann analysiert.

Besonders anzumerken ist hier, dass die Messungen natürlich unter optimalen



Abbildung 14: Kugelplatten für den Laborversuch

Lichtverhältnissen und geringer Schattenbildung durchgeführt wurden und die Anordnung der Kugeln auf den Platten bestmöglich gleichmäßig erfolgte, wie in Abbildung 15 zu erkennen ist.



Abbildung 15: Veranschaulichung Labormessung mit Kugeln

3.4.2 Naturmessungen

Um nun die gewonnenen Erkenntnisse auch an natürlichen Gesteinsverteilungen anwenden zu können, wurden Messungen im freien Feld durchgeführt. Dabei ist anzumerken, dass der Laserscanner nicht in der Lage ist, durch das Wasser zu messen und die Proben daher am Uferbereich oder an Schotterbänken aufgenommen werden mussten. Dazu wurden im August 2020 erste Messungen am Schöttlbach in Oberwölz vorgenommen. Dieser Bach eignet sich aufgrund seines erhöhten Sedimenttransports besonders gut für diese Untersuchungen.

Schöttlbach

Der Schöttlbach liegt im Bezirk Murau in der Steiermark, nahe der Stadtgemeinde Oberwölz. Das Einzugsgebiet des Bachs liegt circa 15 km nordöstlich von Murau in den niederen Tauern (Abbildung 16). Die höhergelegenen Bereiche des Tals sind teilweise durch steile, felsdurchsetzte Hänge gekennzeichnet. In den tieferen Regionen finden sich große Sedimentdepots (Sass, 2012).

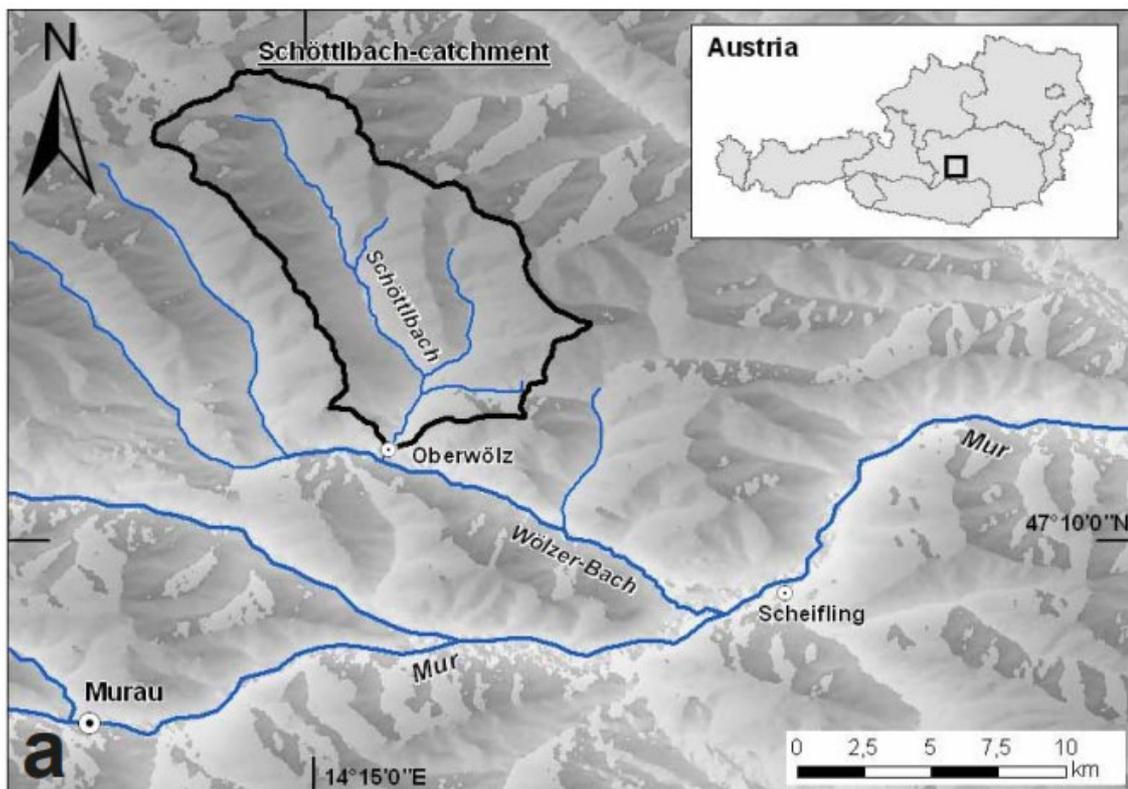


Abbildung 16: Einzugsgebiet des Schöttlbachs (Schneider et al., 2014)

Der mögliche Einfluss des Klimawandels auf die Sedimentbilanz im alpinen Raum wurde durch das Projekt ClimCatch (Schneider et al., 2014) untersucht. Dabei wurde als Projektgebiet die Region um Oberwölz festgelegt, welches durch eine Murgang-Katastrophe im Juli 2011 große Schäden zu verzeichnen hatte. Neben den Sedimentkaskaden und der Beurteilung der Transportprozesse (mittels Laserscannings) wurden auch die Sedimentbewegungen (mittels Tracersteinen und Sediment Impact Sensoren) betrachtet (Schneider et al., 2014).

Messungen

In einem ersten Messschritt wurden drei Standorte für Proben gewählt. Dabei wurden jeweils eine Messung mit dem Laserscanner (Abbildung 17), eine Fotodokumentation (für eine Analyse mittels Basegrain) und die Entnahme von Bodenproben der obersten Bodenschicht durchgeführt.

Im Anschluss an die Messung vor Ort wurden die Daten und Bodenproben dann ausgewertet. Im Labor wurden die drei entnommenen Bodenproben einer Siebanalyse unterzogen. Mittels der aufgenommenen Fotos konnte eine Analyse mit dem Programm Basegrain durchgeführt werden. Ebenso wurde mit den gewonnenen Scandaten eine Berechnung in Python durchgeführt. Bei den ausgewerteten Parametern handelte es sich jeweils um die mittlere Korngrößen (d_{50}), die bestimmt und verglichen wurden.



Abbildung 17: Messung mit dem Laserscanner in Oberwölz

Nach der ersten Messung zeigte sich auch schnell, dass eine Konvergenzstudie durchaus sinnvoll ist, um zu ermitteln, wie viele Standpunkte pro Probe notwendig sind, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten.

Diese erste Naturmessung diente in erster Linie dazu, ein Gefühl zu bekommen, wie sich die Messergebnisse in der Natur verändern und welche Einflussfaktoren zusätzlich beachtet werden müssen. Ebenso sollten die gewonnenen Daten einen Rückschluss auf die Optimierung der folgenden Messungen darstellen.

Nach den Beobachtungen und Auswertungen der ersten Messung konnten bei einer weiteren Messung im September 2020 22 verschiedene Proben betrachtet werden. Dabei wurden immer gleichzeitig drei bis fünf Proben aus zwei bis vier verschiedenen Standpunkten gescannt. Es wurde versucht, möglichst viele verschiedene Bereiche des Schöttlbachs zu vermessen, um Ergebnisse in so vielen verschiedenen Korngrößen wie nur möglich zu erhalten. In Abbildung 18 sind die Standpunkte der Proben entlang des Schöttlbachs zu erkennen.



Abbildung 18: Standpunkte der Proben entlang des Schöttlbachs
(App: "Meine GPS Position", 2020, Wikipedia, 2020b)

In jedem der oben ersichtlichen Standpunkte wurden jeweils mehrere Proben gleichzeitig gescannt, damit immer mehrere Proben gleichzeitig in mehreren Scans zu sehen sind. So lassen sich in Abbildung 19 die verschiedenen Proben

an einem Messort erkennen. Die Zahlen beschreiben dabei die Probennummer (die entsprechenden fotografischen Aufnahmen zu jeder Probe sind im Anhang hinterlegt).



Abbildung 19: Proben an den Messorten (App: "Meine GPS Position", 2020)

Die Probennahme umfasste jeweils das Aufnehmen von Fotos inklusive eines Maßstabes für die Basegrainanalyse, die Markierung der gewählten Flächen mittels Absperrband (um die Probe besser hervorzuheben), das Einzeichnen der Proben in einer virtuellen Karte mittels GPS und die Messung mit dem Laserscanner aus verschiedenen Standpunkten.

Die folgenden Bilder (Abbildung 20 und Abbildung 21) zeigen Aufnahmen, die während der Messung entstanden sind und einen Einblick in die Durchführung ermöglichen sollen. In Abbildung 20 ist neben dem Leica Laserscanner, der zur Messung verwendet wurde, auch eine markierte Fläche für die Auswertung zu erkennen. In Abbildung 21 lassen sich diese markierten Bereiche ebenso erkennen und zusätzlich ist hier auch der erforderliche Maßstabswinkel (erforderlich für die Auswertung mit Basegrain) zu sehen.



Abbildung 20: Messung Oberwölz: Leica Laserscanner, und im Hintergrund Bereich für Auswertung mittels Basegrain



Abbildung 21 Markierung der Flächen, die später ausgewertet werden sollen

Im Anschluss an die Messungen erfolgte die Auswertung der Daten.

4. Auswertungen und Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden zur besseren Übersicht in Teilergebnisse aufgeteilt und chronologisch geordnet, um die Entwicklung der Erkenntnisse leichter nachvollziehen zu können. Die einzelnen Schritte der Auswertung bauen immer auf den Schlussfolgerungen der vorangegangenen Messungen und deren Ergebnisse auf.

Für die Kalibrierung der Berechnungsmethode in der Python-basierten Software wurde in erster Linie die Auswertungen aus der Naturmessung herangezogen.

4.1 Teilergebnis 1: Laborversuch

Aus Tabelle 3 können die Werte, die mittels Python-Auswertung errechnet wurden, entnommen werden. Die Durchmesser wurden jeweils mit der Formel aus Kapitel 3.1 für Kugeldurchmesser errechnet. Die Ergebnisse der Auswertung des Scans in der Laborhalle ergab nur geringe Abweichungen zu den Originalwerten, die mittels Schiebelehre gemessen wurden. Die Abweichungen schwankten dabei vorwiegend im Millimeterbereich, wobei auch größere Abweichungen im Zentimeterbereich zu erkennen sind

Es ist klar ersichtlich, dass die Abweichungen mit dem Durchmesser der Kugeln zunehmen. Dieser Umstand kann auf der Tatsache begründet werden, dass die Laserstrahlen bei größeren Kugeln in den Bereich der Zwischenräume eindringen, und diese Bereiche so einen Miteinfluss haben. Dadurch verändert sich das Ergebnis, da die Strahlen zum Teil bis an die Plattenoberfläche messen und daher nicht rein die Kugeln wiedergeben. Abbildung 22 veranschaulicht die verschiedenen Kugelgrößen.

Tabelle 3: Ergebnisse für die Kugeldurchmesser d aus der Labormessung [cm]

	Kleine Kugeln	Mittlere Kugeln	Große Kugeln
d gemessen	1,65	3,85	7,50
d mit Ra	1,35	4,07	10,59
d mit Rrms	1,25	3,84	11,12



Abbildung 22: Vergleich der 3 Kugelgrößen aus der Labormessung

Ebenso wurde mit den Daten der Labormessung eine Konvergenzstudie (Tabelle 4) durchgeführt, um festzustellen, welchen Einfluss die Anzahl an Standpunkten hat. Die Daten aus der Labormessung sind hier besonders gut geeignet, da sie eine gute Qualität aufweisen und mit zehn Standpunkten auch viele unterschiedliche Ergebnisse bieten. Die Konvergenzstudie wurde mit den Daten für die mittleren Kugeln durchgeführt.

In Tabelle 4 werden Vergleiche angestellt, wenn die Auswertung nur mit einem Standpunkt des Laserscanners, zwei, drei oder mehreren Standpunkten gleichzeitig durchgeführt werden. Speziell am Durchmesser ϵ lässt sich erkennen, dass die Werte im Bereich um 5 cm konvergieren. Auffällig ist auch, dass sich dieses Konvergenz-Phänomen beim arithmetischen Mittelwert R_a und dem quadratischen Mittel R_{rms} zeigt. Weiters konnte durch diese Konvergenzstudie festgestellt werden, dass mit zunehmender Anzahl der Standpunkte auch die Anforderungen an die Rechenleistung erheblich zunehmen und damit auch die Zeit, die für die Auswertung benötigt wird. Während für einen oder zwei Standpunkte kaum eine Minute zur Berechnung benötigt wird, benötigt die Auswertung mit bis zu zehn Standpunkten mehrere Minuten.

Tabelle 4: Konvergenzstudie mit den Korndurchmessern aus der Labormessung [cm]

	Anzahl der Standpunkte									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϵ [cm]	4,066	4,07	4,14	4,22	4,23	4,27	4,77	5,32	5,399	5,366
R_a [cm]	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,39	0,43	0,48	0,490	0,486
R_{rms} [cm]	0,46	0,47	0,48	0,48	0,48	0,49	0,54	0,60	0,601	0,597

4.2 Teilergebnis 2: Erste Messung in Oberwölz

Bei der ersten Messung vor Ort wurden die mittleren Korngrößen auf drei verschiedene Arten (Laserscan, Siebanalyse und Basegrain) bestimmt und verglichen. Diese Messung diente in erster Linie zur Kalibrierung und Festlegung der Parameter für die endgültige Messung zur Evaluierung der Ergebnisse.

Zum besseren Vergleich wurde die Auswertung auf drei verschiedene Arten durchgeführt und verglichen. Die Ergebnisse sind der untenstehenden Tabelle (Tabelle 5 bis Tabelle 7) zu entnehmen.

Tabelle 5: Vergleich der Auswertungen der mittleren Korndurchmesser (d_{50}) für Probe 1 [cm]

PROBE 1	Python	Basegrain	Siebanalyse
E	6,16	1,44	0,7
R_a	0,559		
R_{rms}	0,670		

Tabelle 6: Vergleich der Auswertungen der mittleren Korndurchmesser (d_{50}) für Probe 2 [cm]

PROBE 2	Python	Basegrain	Siebanalyse
E	7,49	1,33	0,9
R_a	0,68		
R_{rms}	1,02		

Tabelle 7: Vergleich der Auswertungen der mittleren Korndurchmesser (d_{50}) für Probe 3 [cm]

PROBE 3	Python	Basegrain	Siebanalyse
E	2,96	1,11	0,27
R_a	0,27		
R_{rms}	0,48		

Zur Veranschaulichung werden in Abbildung 23 bis Abbildung 25 die Proben auch als Foto dargestellt.



Abbildung 23: Fotografische Veranschaulichung von Probe 1



Abbildung 24: Fotografische Veranschaulichung von Probe 2



Abbildung 25: Fotografische Veranschaulichung von Probe 3

Es ist zu erkennen, dass die Fotoanalyse mit Basegrain größere Abweichungen zu den Werten der Siebanalyse und des in Python implementierten Skripts aufweist, allerdings nur, wenn man von den Originalwerten für das arithmetische Mittel und das quadratische Mittel (ohne die Berücksichtigung von ε , und damit ohne zusätzlichen Faktor) ausgeht. Was allerdings berücksichtigt werden muss, ist, dass bei der Entnahme der Bodenprobe für die Siebanalyse nicht vermieden werden konnte, dass auch Feinteile mit entnommen wurden. Dieser Umstand war unausweichlich, da die oberste Deckschicht nur eine geringe Stärke aufwies und eine Mitnahme der darunterliegenden Feinteile damit nicht verhindert werden konnte.

Schon auf den Fotos (Abbildung 23 bis Abbildung 25) ist erkennbar, dass die Bodenprobe 3 die geringsten Korndurchmesser aufweist. Diese Tatsache spiegelt sich in der Siebanalyse und der Python-Auswertung wider. Allerdings zeigt Basegrain hier nur einen geringfügig kleineren Wert als den der beiden anderen Proben. Dieser Umstand kann damit erklärt werden, dass die Probe einen sehr hohen Feinanteil aufweist, der im Basegrain oft fehlerhaft interpretiert wird und nur schwer erfassbar ist.

Da es bei der Entnahme der Bodenproben nicht möglich war, nur die Deckschicht zu entnehmen, sondern auch immer ein gewisser Feinanteil der darunterliegenden Schicht zusätzlich mitentnommen werden musste, war es notwendig, diese Art der Korngrößenbestimmung für diese Arbeit auszuschließen, da in der Python-basierten Software nur die Deckschicht berücksichtigt werden kann und eine Vergleichbarkeit daher nicht gegeben ist.

Zusätzlich wurde mit den Messdaten der ersten Messung ebenfalls eine Konvergenzstudie ausgeführt, um den Einfluss der Standpunkteanzahl zu untersuchen. Dazu wurde abermals verglichen, wie sich die Werte verändern, wenn man nur einen Standpunkt oder mehrere verwendet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 8 bis Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 8: Konvergenzstudie mit den mittleren Korndurchmesser (d_{50}) in Probe 1 [cm]

PROBE 1	Anzahl der Standpunkte				
	1	2	3	4	5
E	6,29	6,60	6,44	6,82	6,16
R_a	0,57	0,60	0,58	0,62	0,56
R_{rms}	0,66	0,72	0,70	0,73	0,67

Tabelle 9: Konvergenzstudie mit den mittleren Korndurchmesser (d_{50}) für Probe 2 [cm]

PROBE 2	Anzahl der Standpunkte				
	1	2	3	4	5
E	4,78	6,12	6,58	7,80	4,78
R_a	0,44	0,56	0,60	0,71	0,43
R_{rms}	0,55	0,77	0,85	1,07	0,55

Tabelle 10: Konvergenzstudie mit den mittleren Korndurchmesser (d_{50}) für Probe 3 [cm]

PROBE 3	Anzahl der Standpunkte				
	1	2	3	4	5
E	1,12	1,32	1,44	1,58	1,98
R_a	0,10	0,12	0,13	0,14	0,18
R_{rms}	0,12	0,15	0,16	0,17	0,22

Auch in den Tabellen (Tabelle 8 bis Tabelle 10) lässt sich, ebenso wie in Abbildung 26, klar erkennen, dass die Werte in einem bestimmten Bereich konvergieren und das Ergebnis sich nicht dauerhaft mit der Anzahl der Standpunkte verbessert. Speziell die zweite Probe lässt erkennen, dass die Wertekurve im

Bereich um vier Standpunkte von der zuerst durchwegs ansteigenden Korn-durchmessergröße, wieder abnimmt (siehe auch Tabelle 9).

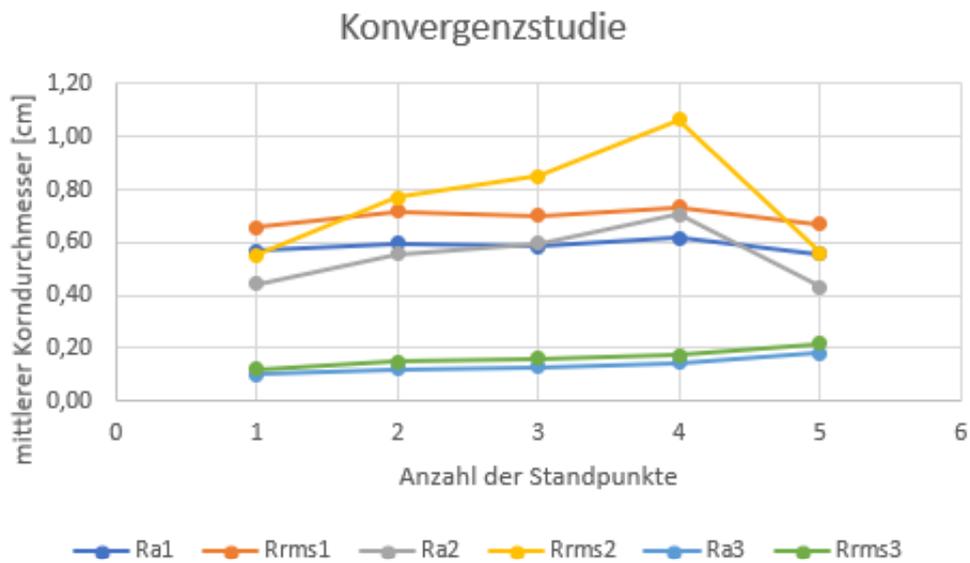


Abbildung 26: Grafische Darstellung der Konvergenzstudie der Proben 1-3

Zusätzlich wurde der Einfluss des Abstandes der Probe zum Laserstandpunkt betrachtet. Dafür wurden für alle drei Proben jeweils die Auswertung von jedem Standpunkt aus einzeln durchgeführt (Tabelle 11). In Abbildung 27 werden die Abstände der Proben zu den jeweiligen Messstandpunkten veranschaulicht. „SP“ steht dabei für die Abkürzung der fünf Standpunkte des Laserscanners und „P“ für die Bezeichnung der drei Proben.

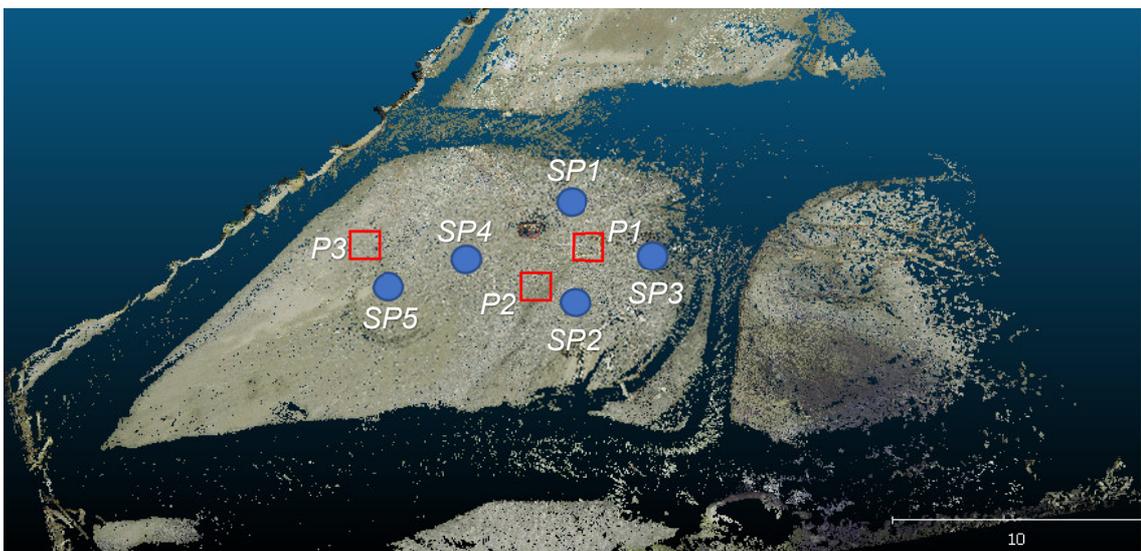


Abbildung 27: Veranschaulichung der 3 Proben und 5 Messstandorte (CloudCompare, 2020)

Probe eins und drei liegen zu manchen Standpunkten sehr nahe und zu anderen ziemlich weit entfernt. Trotzdem bewegen sich die Unterschiede der Ergebnisse nur im Dezimalbereich. Probe zwei hingegen liegt ziemlich mittig zu allen Standpunkten, die Abweichungen untereinander bewegen sich hier aber ebenfalls im Millimeterbereich.

Es kann also schlussgefolgert werden, dass der Abstand zwischen Probe und Messstandpunkt keinen wesentlichen Einfluss hat. Allerdings ist eine nahegelegene Positionierung trotzdem zu empfehlen, da dadurch vermieden werden kann, dass bei weiteren Entfernungen die Laserstrahlen durch Hindernisse beeinträchtigt werden.

Tabelle 11: Korngrößen (d_{50}) bei der Betrachtung aus einzelnen Standpunkten [cm]

PROBE 1	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4	SP 5
E	6,29	6,60	5,73	6,22	6,37
R_a	0,57	0,60	0,52	0,56	0,58
R_{rms}	0,66	0,72	0,63	0,63	0,75
PROBE 2	SP1	SP 2	SP 3	SP 4	SP 5
E	4,88	5,83	4,59	4,80	4,78
R_a	0,44	0,53	0,42	0,44	0,43
R_{rms}	0,55	0,73	0,52	0,56	0,56
PROBE 3	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4	SP 5
E	1,12	1,36	1,51	1,63	1,98
R_a	0,10	0,12	0,14	0,15	0,18
R_{rms}	0,12	0,15	0,17	0,18	0,22

4.3 Zwischenergebnisse

4.3.1 *Ergebnisse Konvergenzstudie*

Aus den beiden Konvergenzstudien (mit den Laborwerten und den drei Proben aus Oberwölz) ging hervor, dass schon mit zwei bis drei Standpunkten repräsentative Ergebnisse erzielt werden können. Die besten Ergebnisse liefern die Messungen im Labor, hierbei findet man bereits bei einem Standpunkt nur geringe Unterschiede.

4.3.2 *Gewonnene Erkenntnisse für die Evaluierungsmessung*

Auffällig war auch, dass in den Laserscandaten teils Höhenpunkte existieren, die für die Auswertung herausgefiltert beziehungsweise herausgeschnitten werden mussten, weil sie das Ergebnis maßgeblich beeinflussten.

Ebenso konnte aus der ersten Messung die Erkenntnis gewonnen werden, dass es unabdingbar ist, die Messgenauigkeit des Laserscanners auf die feinste Stufe einzustellen. Zusätzlich sollte der Laserscanner auch so eingestellt sein, dass bewegte Objekte automatisch herausgefiltert werden und es empfiehlt sich, die Bereiche, die später ausgewertet werden sollen, farblich zu kennzeichnen, damit die Koordinaten später leichter ausgelesen werden können.

4.4 Teilergebnis 3: Zweite Messung in Oberwölz

Basierend auf den Beobachtungen und Erkenntnissen aus der ersten Messung konnte im September 2020 die Hauptmessung durchgeführt werden. Bei dieser Messung wurden 22 möglichst verschiedene Probenahmestellen betrachtet, um verschiedenste Messungsergebnisse für die Validierung der Python-basierten Software zu erhalten.

4.4.1 Vergleich: Mit und ohne Filter

Zu Beginn wurde hier mit einem anfangs erarbeiteten Filter gearbeitet, der höhenmäßige Ausreißer herausfiltern sollte. Während der Auswertung zeigte sich allerdings, dass dieser Filter nicht optimal funktioniert und speziell bei größeren Korngrößen oft wichtige Punkte mit herausfiltert. Um dies zu vermeiden, wurde für die weitere Auswertung der Filter deaktiviert und vorab im Programm CloudCompare grafisch eine Anpassung der Punkte vorgenommen (vergleiche Kapitel 3.2.2). Tabelle 12 zeigt dabei die Unterschiede in der Korngrößenberechnung mit dem arithmetischen (R_a) und dem quadratischen Mittel (R_{rms}) jeweils mit und ohne Filter.

Die Korndurchmesser mit der Verwendung des Filters erscheinen im Vergleich zu den Basegrainwerten größtenteils als zu klein. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass der Filter speziell bei größeren Steinen dazu neigt, zu viele Punkte herauszuschneiden (siehe Kapitel 3.2.3) und damit größere Steine nicht zu berücksichtigen. Das Ergebnis wird damit fehlerhaft. Aufgrund der größeren Abweichungen mit dem Filter zum Basegrain wurde entschieden, auf den Filter zu verzichten und die Scandaten vorab grafisch zuzuschneiden (siehe Kapitel 3.2.2).

Tabelle 12: Vergleich der Korndurchmesser (d_{50}) mit und ohne Filter (für Ra und Rrms) [cm]

	Basegrain	Mit Filter Ra	Ohne Filter Ra	Mit Filter Rrms	Ohne Filter Rrms
1	4,73	2,04	3,12	2,37	3,69
2	5,48	2,14	4,30	2,49	5,33
3	8,57	1,74	2,49	2,25	3,00
4	2,17	0,93	1,36	1,12	2,10
5	2,25	1,50	2,89	1,80	2,33
6	2,30	0,69	1,42	0,86	1,70
7	2,93	0,82	1,44	1,00	1,80
8	2,02	1,08	1,31	1,34	1,67
9	6,73	2,75	5,05	3,45	6,12
10	2,26	1,42	2,53	1,74	3,10
11	4,06	2,13	3,47	2,60	4,23
12	1,98	1,17	2,35	1,49	3,21
13	1,25	0,32	0,53	0,38	0,70
14	3,15	0,92	1,47	1,11	1,88
15	3,01	1,26	2,10	1,52	2,57
16	3,86	1,30	2,07	1,51	2,61
17	2,45	0,36	0,94	0,46	1,25
18	1,87	0,42	0,66	0,51	0,90
19	1,38	0,58	0,90	0,71	1,17
20	1,89	0,35	0,53	0,45	0,68
21	1,37	0,81	1,42	0,98	2,04
22	1,66	0,57	1,10	0,72	1,47

4.4.2 Vergleich: Unterschiedlich große Bereiche

Weiters wurde ein Vergleich angestellt, bei dem der Einfluss der Größe des ausgewerteten Bereichs ermittelt werden sollte. Dazu wurden mittels Python die ursprünglichen Quadrate von circa 1x1 Meter (vorgegeben durch den Maßstabswinkel von der Basegrain-Auswertung) ausgewertet. Ebenso wurden innerhalb dieser Quadrate noch kleinere Untersuchungsflächen (grob 20x20 cm) koordinativ abgesteckt und ebenfalls ausgewertet (Tabelle 13).

Es lässt sich im Vergleich erkennen, dass die Werte für die Korndurchmesser, sowohl für das arithmetischen Mittel (R_a) als auch für das quadratischen Mittel (R_{rms}), die mit den kleineren Flächen errechnet wurden, nur geringfügig von den Werten der größeren Flächen abweichen und sich vermehrt auch an die Basegrain-Auswertung annähern. Es wurde entschieden, für die weiteren Untersuchungen mit den Ergebnissen der kleineren Flächen zu arbeiten.

Tabelle 13: Vergleich der Korndurchmesser (d_{50}) in unterschiedlich großen Flächen jeweils für das arithmetische Mittel (R_a) und das quadratische Mittel (R_{rms}) [cm]

	Basegrain	Groß Ra	Groß Rrms	Klein Ra	Klein Rrms
1	4,73	3,12	3,69	3,45	3,96
2	5,48	4,30	5,33	5,52	6,05
3	8,57	2,49	3,00	1,99	3,01
4	2,17	1,36	2,10	1,95	2,81
5	2,25	2,89	2,33	1,72	2,13
6	2,30	1,42	1,70	1,24	1,55
7	2,93	1,44	1,80	1,22	1,52
8	2,02	1,31	1,67	0,75	1,01
9	6,73	5,05	6,12	3,14	4,35
10	2,26	2,53	3,10	2,81	3,66
11	4,06	3,47	4,23	1,80	2,27
12	1,98	2,35	3,21	1,52	2,17
13	1,25	0,53	0,70	0,58	0,80
14	3,15	1,47	1,88	1,29	1,76
15	3,01	2,10	2,57	1,79	2,05
16	3,86	2,07	2,61	1,78	2,31
17	2,45	0,94	1,25	1,09	1,36
18	1,87	0,66	0,90	0,48	0,63
19	1,38	0,90	1,17	0,72	0,95
20	1,89	0,53	0,68	0,53	0,70
21	1,37	1,42	2,04	1,80	2,48
22	1,66	1,10	1,47	1,26	1,63

4.4.3 Endgültige Ergebnisse und deren Abweichungen

Die finalen Ergebnisse für die kleineren Flächen und ohne Filter lassen sich aus Tabelle 13 entnehmen. Abbildung 28 zeigt den grafischen Vergleich der finalen Korngrößen für das Arithmetische Mittel (Ra), das quadratische Mittel (Rrms) und Basegrain.

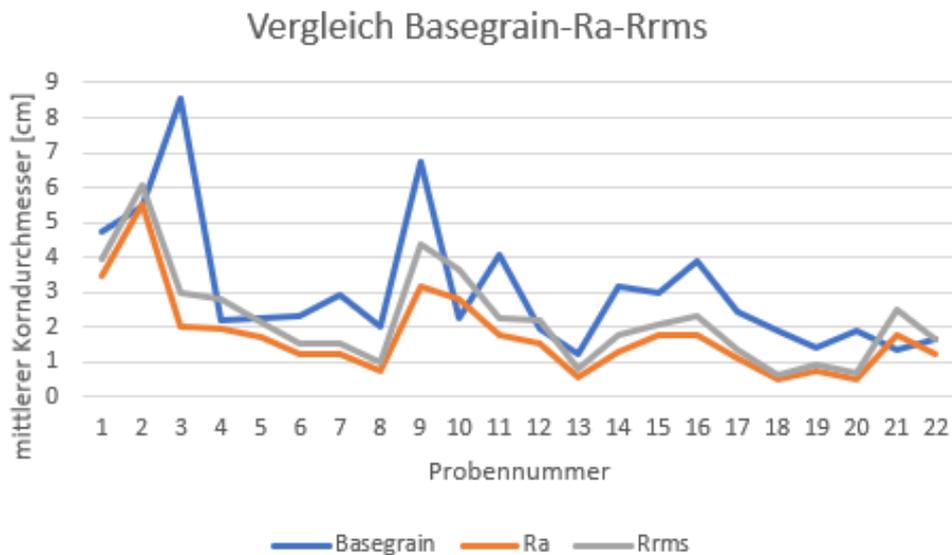


Abbildung 28: Grafischer Vergleich der finalen Korngrößen (Basegrain-Ra-Rrms)

Zusätzlich wurden die absoluten Differenzen zwischen den Basegrain-Werten und dem arithmetischen (Ra) beziehungsweise quadratischem Mittel (Rrms) berechnet (Tabelle 14). Ebenso wurden in Tabelle 14 die relativen Differenzen (prozentuale Abweichungen) errechnet, indem die absoluten Differenzen auf den jeweiligen Wert aus der Basegrainauswertung bezogen wurden (siehe auch Abbildung 30). Auch im Vergleich der Differenzen wird deutlich, dass die Werte für das arithmetische Mittel (Ra) und das quadratische Mittel (Rrms) gut an die Werte, die mittels Basegrain ermittelt wurden, herankommen. Ebenso kann man sagen, dass die größten Abweichungen im Zentimeterbereich schwanken, wobei auch einige Werte bis in den Millimeterbereich übereinstimmen.

Tabelle 14: Differenzen zwischen Basegrain und arithm. (Ra) bzw. quadrat. Mittel (Rrms) [cm und %]

	Abs. Diff. Ra [cm]	Abs. Diff. Rrms [cm]	Proz. Diff. Ra [%]	Proz. Diff. Rrms [%]
1	1,28	0,77	27	16
2	-0,04	-0,57	1	10
3	6,58	5,56	77	65
4	0,22	-0,64	10	29
5	0,53	0,12	24	5
6	1,06	0,75	46	32
7	1,71	1,41	58	48
8	1,28	1,01	62	48
9	3,59	2,38	53	35
10	-0,56	-1,40	25	62
11	2,26	1,79	56	44
12	0,46	-0,19	23	10
13	0,67	0,45	53	36
14	1,86	1,39	59	44
15	1,22	0,96	41	32
16	2,08	1,55	54	40
17	1,36	1,09	55	44
18	1,39	1,24	74	66
19	0,66	0,43	48	31
20	1,36	1,19	72	63
21	-0,43	-1,11	31	81
22	0,40	0,03	24	2

In Abbildung 29 sollen die absoluten Abweichungen deutlicher veranschaulicht werden.

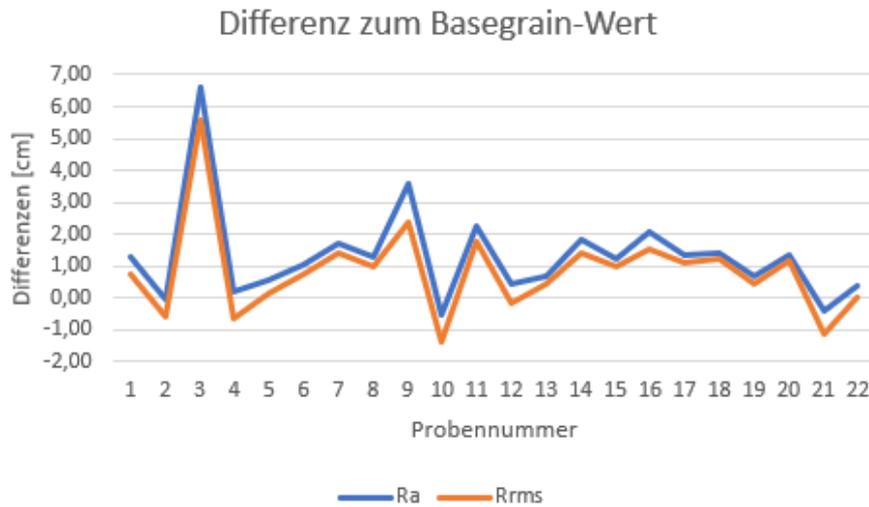


Abbildung 29: Differenzen zwischen Basegrain und arithm. (Ra) bzw. quadr. Mittel (Rrms)

Wie bereits beschrieben, wurden die zuvor errechneten Differenzen dann auf einen Bezugswert, in diesem Fall der jeweilige Basegrain-Wert, bezogen, um eine prozentuale Verteilung zu erzeugen (Abbildung 30).

Aufgrund der Korngrößen (welche sich im Zentimeterbereich bewegen) erscheinen die prozentuellen Abweichungen meist sehr groß, da diese auf den Basegrainwert bezogen wurden. Vergleicht man dazu allerdings die jeweiligen absoluten Differenzen aus Tabelle 14, so kann man erkennen, dass auch bei hohen prozentuellen Abweichungen oft nur Unterschiede im Zentimeterbereich auftreten.

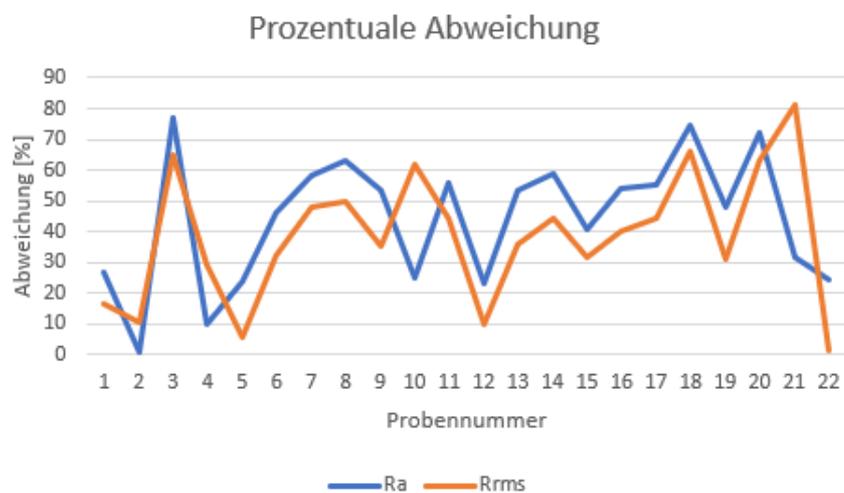


Abbildung 30: Prozentuale Abweichung zwischen Basegrain und dem arithm. (Ra) bzw. dem quadr. Mittel (Rrms)

Ebenso ist aber auch zu erkennen, dass zum Beispiel Probe 3 und Probe 18 sowohl verhältnismäßig große absolute (Abbildung 29) als auch sehr hohe relative Differenzen (Abbildung 30) aufweisen (Tabelle 14). Dieser Umstand kann damit begründet werden, dass in diesen Proben entweder sehr große Steine vorkommen wie in Probe 3 (siehe Abbildung 31), welche durch Basegrain optisch besser erfassbar sind oder ein sehr hoher Feinanteil auftritt wie in Probe 18. Im Scan verdecken große Steine die dahinterliegenden kleineren Steine und dadurch kann es zu veränderten Ergebnissen kommen. Ebenso beeinflusst ein hoher Feingehalt die Auswertung, da diese Anteile von Basegrain oft fälschlicherweise verbunden und als größere Steinen interpretiert werden.



Abbildung 31: Fotografische Veranschaulichung von Probe 3 und Probe 18

Regression

Leider zeigt die Regression, dass der Zusammenhang zwischen den Basegrain-Werten und den Werten aus den beiden Mittelwertsberechnungen nur gering ausfällt. Für die Analyse des arithmetischen Mittels (Abbildung 32) ergibt sich nur ein Wert von 35,08%. Bei der Analyse für das quadratische Mittel (Abbildung 33) ist der Wert etwas höher, mit 42,08% aber immer noch relativ gering.

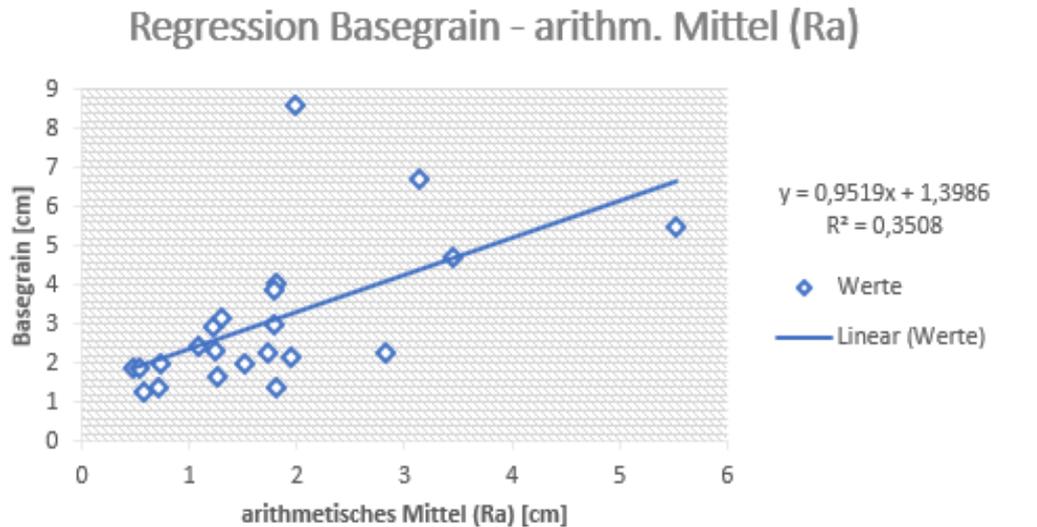


Abbildung 32: Regressionsanalyse arithmetisches Mittel (Ra)

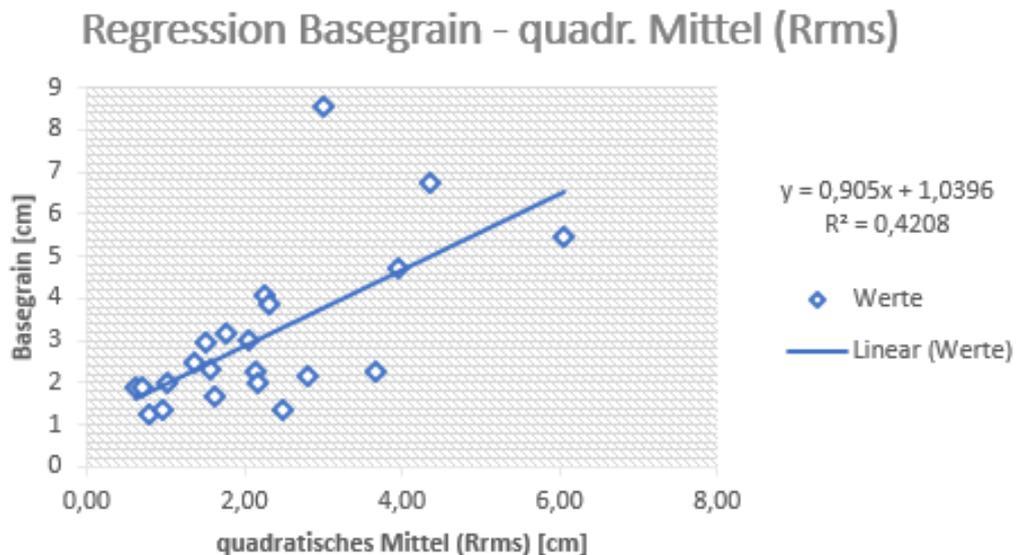


Abbildung 33: Regressionsanalyse quadratisches Mittel (Rrms)

Die relativ schlechten Ergebnisse der Regressionsanalyse lassen sich damit erklären, dass einige wenige vereinzelte Ausreißer das Ergebnis verfälschen. Diese treten speziell bei höheren Korndurchmessern auf.

4.5 Rauheitsbeiwerte nach Strickler

Die Rauheitsbeiwerte nach Strickler wurden nach verschiedensten Ansätzen errechnet und verglichen (vergleiche Kapitel 2.2.1, Gleichung [9] bis [16]).

Da mit dem implementierten Skript nur der mittlere Korndurchmesser d_{50} (und nicht d_{90}) ausgegeben werden kann, wird für k_s (charakteristisches Maß für die Rauheit) folgender Wert nach Gleichung [8] angenommen (Rickenmann, 2014).

In Tabelle 15 werden die errechneten k_s -Werte dann mit den d_{90} -Werten der Basegrain-Analyse verglichen. Es ist zu erkennen, dass die beiden aus den Mittelwerten errechneten Rauheiten meist ziemlich nahe beieinander liegen. Zum Teil passen auch die d_{90} -Werte aus der Basegrain-Analyse gut dazu (zum Beispiel in Probe 8), allerdings muss man auch sagen, dass im Extremfall die Abweichungen zueinander über 10 cm aufweisen (zum Beispiel Probe 2). Das kann daran liegen, dass in Probe 2 viele Feianteile auftreten, die im Basegrain leicht missinterpretiert werden können (vergleiche Abbildung 34). Ebenso ist die Errechnung der charakteristischen Rauheit k_s aus den Mittelwerten über eine empirische Annahme nicht exakt.



Abbildung 34: Fotografischer Vergleich Probe 2 und Probe 8

Tabelle 15: Vergleich des charakteristischen Rauheitsmaßes k_s und d_{90} [cm]

	Basegrain d_{90}	Arithm. Mittel $4,5 \cdot Ra$	Quadr. Mittel $4,5 \cdot R_{rms}$
1	11,63	15,54	17,83
2	12,15	24,85	27,23
3	19,24	8,97	13,53
4	4,07	8,78	12,64
5	4,12	7,74	9,57
6	4,11	5,60	7,00
7	5,76	5,50	6,85
8	3,77	3,34	4,56
9	12,98	14,11	19,57
10	4,18	12,68	16,47
11	8,19	8,09	10,20
12	3,74	6,85	9,77
13	2,09	2,62	3,61
14	5,92	5,82	7,90
15	5,68	8,05	9,23
16	7,96	8,01	10,41
17	4,30	4,91	6,12
18	4,10	2,16	2,84
19	2,14	3,25	4,27
20	3,9	2,39	3,14
21	2,14	8,10	11,17
22	2,91	5,66	7,34

Im folgenden Abschnitt werden nun die Strickler-Beiwerte für jede Probe über verschiedene Ansätze (siehe Gleichungen [9] bis [16]) errechnet, verglichen und auf Plausibilität geprüft.

1) Meyer-Peter und Müller	(Gleichung [9])
2) Strickler	(Gleichung [10])
3) Wong und Parker	(Gleichung [11])
4) Schöberl	(Gleichung [12])
5) DVWK	(Gleichung [13])
6) Manning-Strickler	(Gleichung [14])
7) Absolut deviation relation (LAD)	(Gleichung [15])
8) 20% Quantil	(Gleichung [16])

Tabelle 16 und Tabelle 17 zeigen die Strickler-Werte nach den verschiedenen Ansätzen jeweils für das arithmetische und das quadratische Mittel.

Zur besseren Vergleichbarkeit sollen hier die in Tabelle 1 und Tabelle 2 (Kapitel 2.2.2) angegebenen Werte für Fließgewässer als Richtwert angenommen werden. Man kann aus der Auswertung erkennen, dass die Werte aus der Berechnung nach dem Ansatz der absoluten Abweichungsrelation (Absolut deviation relation (LAD); Gleichung [15]) die niedrigsten Werte zeigen und sich daher der Realität am besten annähern. Tendenziell liegen die errechneten Werte eher etwas höher als jene, die in der Literatur angeführt werden. Die Messung mittels Laserscan erlaubt keine Messungen durch die Wasseroberfläche, weshalb die Proben alle im Bereich von Ufern und Schotter- beziehungsweise Sandbänken aufgenommen wurden. Hier wurden teilweise hohen Anteile an Feinsediment abgelagert, wodurch sich die Werte der Strickler-Rauheiten im Bank- und Uferbereich von jenen im Sohlbereich etwas unterscheiden. Dieser Umstand könnte, unter anderem, auch eine Rolle für die höheren Stricklerbeiwerte spielen. Tabelle 2 (in Kapitel 2.2) ist aber auch zu entnehmen, dass die k_{st} -Werte für Kies und Steine zwischen 40 und 43 liegen können.

Tabelle 16: Stricklerwerte k_{St} für das arithmetische Mittel (R_a) in $[m^{1/3}/s]$

	Meyer-Peter & Müller	Strickler	Wong & Parker	Schöberl	DVWK	Manning-Strickler	LAD	20% Quantil
1	35	29	36	32	29	42	20	28
2	33	26	33	30	26	39	15	23
3	39	31	39	35	31	46	26	36
4	39	31	39	35	32	47	26	36
5	40	32	40	36	32	48	28	38
6	42	34	42	38	34	50	33	44
7	42	34	42	38	34	50	33	44
8	46	37	46	41	37	55	42	55
9	36	29	36	33	29	43	21	30
10	37	30	37	33	30	44	22	31
11	40	32	40	36	32	47	27	37
12	41	33	41	37	33	48	29	40
13	48	39	48	43	39	57	48	61
14	42	34	42	38	34	50	32	43
15	40	32	40	36	32	47	27	38
16	40	32	40	36	32	47	27	38
17	43	35	43	39	35	51	35	46
18	49	40	49	45	40	59	52	66
19	46	37	46	42	37	55	43	56
20	48	39	49	44	39	58	50	63
21	40	32	40	36	32	47	27	37
22	42	34	42	38	34	50	32	44

Tabelle 17: Stricklerwerte k_{St} für das quadratische Mittel (R_{rms}) in $[m^{1/3}/s]$

	Meyer-Peter & Müller	Strickler	Wong & Parker	Schöberl	DVWK	Manning-Strickler	LAD	20% Quantil
1	35	28	35	31	28	41	18	27
2	32	26	32	29	26	39	15	22
3	36	29	36	33	29	43	21	30
4	37	30	37	33	30	44	22	31
5	38	31	39	35	31	46	25	35
6	41	33	41	37	33	48	29	40
7	41	33	41	37	33	48	29	40
8	43	35	44	39	35	52	36	48
9	34	28	34	31	28	41	17	26
10	35	28	35	32	28	42	19	28
11	38	31	38	34	31	45	24	34
12	38	31	38	35	31	46	25	35
13	45	37	45	41	37	54	41	53
14	40	32	40	36	32	47	27	38
15	39	31	39	35	31	46	25	35
16	38	31	38	34	31	45	24	34
17	41	33	41	37	33	49	31	42
18	47	38	47	43	38	56	46	59
19	44	35	44	40	36	52	37	49
20	46	37	46	42	37	55	44	56
21	37	30	38	34	30	45	23	33
22	40	32	40	36	32	48	28	39

4.6 Gesamtergebnis

Aus dem Laborversuch lässt sich schließen, dass eine Auswertung unter optimalen Laborbedingungen sehr nahe an das gemessene Ergebnis kommt, wenn man die mathematische Herangehensweise $\varepsilon=11,03 \cdot R_a$ für Kugeln verwendet. Ebenso zeigte die Konvergenzstudie, dass es nicht notwendig ist, möglichst viele Standpunkte zu setzen, sondern auch mit wenigen Standpunkten durchaus brauchbare Ergebnisse erzielt werden können. Zu beachten ist dabei, dass die Standpunkte möglichst nahe an dem Bereich sind, der ausgewertet werden soll.

Zu demselben Schluss führte auch die Konvergenzstudie nach der ersten Naturmessung, nur zeigte sich hier zusätzlich, dass eine farbliche Markierung des auszuwertenden Bereichs sinnvoll ist und auch die Einstellungen des Lasers eine Rolle spielen. Zusätzlich konnte bei der Naturmessung erkannt werden, dass der mathematische Ansatz für Kugeln bei Gesteinen in der Natur nicht zielführend ist, vielmehr erzielte bereits die Errechnungen des Mittelwerts allein gute Ergebnisse. Im Vergleich mit der Siebanalyse und dem Programm Basegrain zeigte die Auswertung mittels Scandaten zwar Abweichungen, aber die Größenordnung der errechneten Werte ist trotzdem realistisch.

In der zweiten Naturmessung, die auch zur Validierung diente, wurden die zuvor gewonnen Erkenntnisse dann umgesetzt. So war es möglich, relativ gute und realistische Ergebnisse für die Korngrößen zu erzeugen. In der Auswertung wurden hier verschiedene Aspekte wie die Größe des auszuwertenden Bereichs oder die Verwendung eines Filters berücksichtigt.

Final wurden die Stricklerbeiwerte errechnet. Dazu wurden verschiedenste Ansätze verwendet, von denen alle in einem ähnlichen Bereich zu liegen kamen und die Annahme nach der absoluten Abweichungsrelation (LAD) die realitätsgetreuesten Werte zurückgab. Ebenso war festzustellen, dass das quadratische Mittel bessere Werte lieferte als die Berechnung nach dem arithmetischen Mittel.

5. Fazit

5.1 Vorteile

Der Laser ermöglicht es, in geringer Zeit eine hochauflösende Darstellung der gemessenen Topografie zu erstellen. Die Vorteile des Laserscannings liegen daher in der schnellen und einfachen Erfassung der Daten aus der Natur. Der Laser kalibriert und horizontiert sich selbst und verringert dadurch erheblich die Fehlerquellen in der Datenerfassung. Die Anwendung ist einfach, da lediglich die bearbeitete Scandatei und die Koordinaten des Bereichs eingegeben werden müssen.

Die Auswertung der Ergebnisse, zeigt, dass mit dieser Methode durchaus realistische Ergebnisse erreicht werden können, die angesichts der geforderten Genauigkeit für die Weiterverwendung der Strickler-Beiwerte akzeptiert werden können.

Zusätzlich scheint eine Auswertung mit dieser Methode auch stabiler als beispielsweise mittels Basegrain, da die Auswertung mit der Python-basierten Software über den gesamten Zeitraum fehlerfrei funktioniert hat.

5.2 Nachteile

Nachteilig ist allerdings, dass zur Übertragung der Daten auf den PC hohe Rechnerleistungen gefragt sind, um die Übertragung in einer angemessenen Zeitspanne zu meistern (vergleiche Kapitel 3.2.2). Die Vorbearbeitung der Punktwolken erwies sich als relativ simpel und leicht verständlich.

Zusätzlich ist auch zu vermerken, dass die Kosten der Anschaffung eines Laserscanners deutlich höher liegen als beispielsweise für eine Standard-Kamera, welche für die Auswertung mittels Basegrain benötigt wird.

Besonders hervorzuheben ist, dass mit dem Laser nicht durch die Wasseroberfläche gemessen werden kann und daher immer davon ausgegangen werden muss, dass die Ufer- und Bankbereiche eine ähnliche Kornverteilung aufweisen. Allerdings ist dieses Problem derzeit auch mittels Basegrain nicht zu beheben.

5.3 Verbesserungsmöglichkeiten

Natürlich wäre eine Weiterentwicklung in der Laserscantechnologie hilfreich beziehungsweise die Verwendung eines anderen Gerätetyps, um das Messen durch die Wasseroberfläche und dadurch das Vermessen der Gewässersohle direkt zu ermöglichen.

5.4 Zusammenfassung

Generell ist es wichtig, dass die Entwicklung auch in diesem Bereich nicht stillsteht und neue Technologien wie der Laserscanner auch hier Anwendung finden. Im Allgemeinen bietet die Korngrößenevaluierung mittels Laserscanner noch viel Potential.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass mit Hilfe des Laserscans und einem einfachen Skript in Python eine relativ schnelle und einfache Methode zur Auswertung und Berechnung von Korngrößen und damit zur Bestimmung der Rauheiten erreicht werden kann.

Besonders im Vergleich zur Siebanalyse besticht diese Methode mittels Laserscanner durch eine relative schnelle und automatisierte Handhabung. Da der Laserscanner größtenteils selbstständig misst, besteht die Hauptaufgabe des Benutzers darin, die richtige Stelle vom Laserscanner erfassen zu lassen, diese Daten auf den Computer zu übertragen und die bearbeiteten Daten in die Python-basierte Software einzulesen. Danach müssen lediglich die Koordinaten des auszuwertenden Bereichs definiert werden. Diese Methode ist daher auch relativ schnell zu erlernen und erfordert (abgesehen von einer eventuellen Einschulung in den Laser und das Bearbeiten der Laserdaten) kein spezielles Vorwissen zur Verwendung.

Durch die Auswertung wurde klar erkennbar, dass die besten Ergebnisse natürlich unter Laborbedingungen erreicht werden. Dieser Umstand spiegelt sich speziell in der Konvergenzanalyse wider. Hier konnten bei einer Analyse, in der die Ergebnisse aus den Berechnungen mit verschiedener Standpunktanzahl des Scanners verglichen wurden, keine markanten Abweichungen der Ergebnisse festgestellt werden.

Allerdings zeigte sich auch, dass diese Art der Rauheiten-Bestimmung ebenso in der Natur angewandt werden kann. Die Regressionsanalyse zeigte zwar keinen vollständigen linearen Zusammenhang zwischen den Vergleichswerten aus Basegrain und den errechneten Werten aus den Scandaten, allerdings sind Messungen in der Natur immer von verschiedensten zusätzlichen Einflussfaktoren beeinträchtigt, wodurch es zu Ausreißern kommen kann, welche diese Analyse maßgeblich beeinträchtigen.

Im Allgemeinen konnten aber sowohl für die Korngrößen als auch für die Rauheiten nach Strickler plausible Ergebnisse erreicht werden. Die Abweichungen im Zentimeterbereich können akzeptiert werden, da die Einsatzbereiche der Rauheitsbeiwerte keine größere Genauigkeit erwarten lässt. Auch mit anderen Methoden, wie zum Beispiel der Basegrain-Analyse, lassen sich keine genaueren Ergebnisse erzielen. Die mit dieser Methode entwickelten Ergebnisse für die mittleren Korndurchmesser sind also ausreichend genau, um weiterverwendet zu werden. Ebenso zeigte sich, dass das quadratische Mittel zumeist die plausibleren Ergebnisse liefert (auch wenn die Abweichungen zum arithmetischen Mittel gering sind), wobei hier zusätzlich zu erwähnen ist, dass bei den Naturmessungen schon eine reine Auswertung des Mittelwerts die geforderten Ergebnisse erzielte und auf eine Umrechnung mittels eines mathematischen Faktors (wie bei den Kugeln) verzichtet werden konnte.

Die Auswertung über das in Python implementierte Skript funktioniert problemlos und liefert innerhalb kürzester Zeit die errechneten Ergebnisse. Lediglich die Übertragung und Vorbereitung der Daten aus dem Laser erfordert einen einzukalkulierenden Zeitaufwand. Zusätzlich muss auch vermerkt werden, dass es dem Laser nicht möglich ist, durch Wasser zu messen und die Ergebnisse daher immer nur eine Annäherung an die wahren Rauheiten an der Flusssohle darstellen kann.

Zusammenfassend stellt die Verwendung (und Weiterentwicklung) dieser Methode somit eine sinnvolle Alternative zu den bisherigen Verfahren dar und sollte auch in Zukunft zur Anwendung kommen.

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Raue Oberfläche eines willkürlichen Profils (Adams et al., 2012)	17
Abbildung 2: Gleichmäßige Reihe von Halbkugeln (Adams et al., 2012).....	18
Abbildung 3: App Leica Cyclone FIELD 3D.....	21
Abbildung 4: Leica RTC360 (Leica Geosystems, 2020).....	22
Abbildung 5: Grafische Darstellung der Ebene in Python	23
Abbildung 6: Ablaufdiagramm des Codes	24
Abbildung 7: Siebturm (ifMU, 2020)	26
Abbildung 8: Programmansicht Fotosiebung mittels Basegrain (ETH Zürich, 2014).....	28
Abbildung 9: Bedienleiste Basegrain: Befehl Skalierung (ETH Zürich, 2014) ..	28
Abbildung 10: Basegrain: Befehl Bereichsauswahl (ETH Zürich, 2014).....	29
Abbildung 11: Bedienleiste Basegrain: Befehl Analyse (ETH Zürich, 2014)	29
Abbildung 12: Symbolbild Nachbearbeitung in BASEGRAIN (ETH Zürich, 2014)	30
Abbildung 13: Symbolbild Grafische Auswertung BASEGRAIN (ETH Zürich, 2014).....	30
Abbildung 14: Kugelplatten für den Laborversuch.....	31
Abbildung 15: Veranschaulichung Labormessung mit Kugeln	32
Abbildung 16: Einzugsgebiet des Schöttlbachs (Schneider et al., 2014)	33
Abbildung 17: Messung mit dem Laserscanner in Oberwölz	34
Abbildung 18: Standpunkte der Proben entlang des Schöttlbachs (App: "Meine GPS Position ", 2020, Wikipedia, 2020b).....	35
Abbildung 19: Proben an den Messorten (App: "Meine GPS Position", 2020).	36
Abbildung 20: Messung Oberwölz: Leica Laserscanner, und im Hintergrund Bereich für Auswertung mittels Basegrain	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abbildung 21: Markierung der Flächen, die später ausgewertet werden sollen	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 22: Vergleich der 3 Kugelgrößen aus der Labormessung	39
Abbildung 23: Fotografische Veranschaulichung von Probe 1.....	41
Abbildung 24: Fotografische Veranschaulichung von Probe 2.....	41
Abbildung 25: Fotografische Veranschaulichung von Probe 3.....	41
Abbildung 26: Grafische Darstellung der Konvergenzstudie der Proben 1-3 ...	44
Abbildung 27: Veranschaulichung der 3 Proben und 5 Messstandorte (CloudCompare, 2020)	44
Abbildung 28: Grafischer Vergleich der finalen Korngrößen (Basegrain-Ra-Rrms)	51
Abbildung 29: Differenzen zwischen Basegrain und arithm. (Ra) bzw. quadr. Mittel (Rrms)	53
Abbildung 30: Prozentuale Abweichung zwischen Basegrain und dem arithm. (Ra) bzw. dem quadr. Mittel (Rrms).....	53
Abbildung 31: Fotografische Veranschaulichung von Probe 3 und Probe 18 ..	54
Abbildung 32: Regressionsanalyse arithmetisches Mittel (Ra).....	55
Abbildung 33: Regressionsanalyse quadratisches Mittel (Rrms)	55
Abbildung 34: Fotografischer Vergleich Probe 2 und Probe 8	56

7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rauheiten für natürliche Fließgewässer (TU Bergakademie Freiberg, 2016).....	11
Tabelle 2: kSt-Werte für Kies (Landesanstalt für Umweltschutz and Baden-Württemberg, 2003).....	11
Tabelle 3: Ergebnisse für die Kugeldurchmesser d aus der Labormessung [cm]	38
Tabelle 4: Konvergenzstudie mit den Korndurchmessern aus der Labormessung [cm].....	39
Tabelle 5: Vergleich der Auswertungen der mittleren Korndurchmesser (d50) für Probe 1 [cm]	40
Tabelle 6: Vergleich der Auswertungen der mittleren Korndurchmesser (d50) für Probe 2 [cm]	40
Tabelle 7: Vergleich der Auswertungen der mittleren Korndurchmesser (d50) für Probe 3 [cm]	40
Tabelle 8: Konvergenzstudie mit den mittleren Korndurchmesser (d50) in Probe 1 [cm].....	43
Tabelle 9: Konvergenzstudie mit den mittleren Korndurchmesser (d50) für Probe 2 [cm].....	43
Tabelle 10: Konvergenzstudie mit den mittleren Korndurchmesser (d50) für Probe 3 [cm]	43
Tabelle 11: Korngrößen (d50) bei der Betrachtung aus einzelnen Standpunkten [cm].....	45
Tabelle 12: Vergleich der Korndurchmesser (d50) mit und ohne Filter (für Ra und Rrms) [cm]	48
Tabelle 13: Vergleich der Korndurchmesser (d50) in unterschiedlich großen Flächen jeweils für das arithmetische Mittel (Ra) und das quadratische Mittel (Rrms) [cm].....	50

Tabelle 14: Differenzen zwischen Basegrain und arithm. (Ra) bzw. quadrat. Mittel (Rrms) [cm und %].....	52
Tabelle 15: Vergleich des charakteristischen Rauheitsmaß ks und d90 [cm] ..	57
Tabelle 16: Stricklerwerte k_{st} für das arithmetische Mittel (Ra) in $m13s$	58
Tabelle 17: Stricklerwerte k_{st} für das quadratische Mittel (Rrms) in $m13s$	60

8. Literaturverzeichnis

- Adams, T., Grant, C., Watson, H., 2012. A Simple Algorithm to Relate Measured Surface Roughness to Equivalent Sand-grain Roughness. *Int. J. Mech. Eng. Mechatron.* <https://doi.org/10.11159/ijmem.2012.008>
- App: "Meine GPS Position", 2020. Lokalisierung Standpunkte (über App: "Meine GPS Position").
- Ben, 2020. linear algebra - Best Fitting Plane given a Set of Points. *Math. Stack Exch.* URL <https://math.stackexchange.com/questions/99299/best-fitting-plane-given-a-set-of-points> (accessed 12.30.20).
- Bezzola, G.R., Gantenbein, S., Hollenstein, R., Minor, H.-E., 2002. 175.pdf [WWW Document]. URL <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2000-2009/175.pdf> (accessed 12.8.20).
- Blickfeld, 2020. Was ist LiDAR? Blickfeld. URL <https://www.blickfeld.com/de/was-ist-lidar/> (accessed 12.23.20).
- Brock, J., Wright, C., Nayegandhi, A., Woolard, J., Patterson, M., Wilson, I., Traversers, L., 2007. USGS-NPSNASA EAARL Submarine Topography – Florida Keys National Marine Sanctuary, USGS Open File Report 2007–1395 (DVD).
- Bundesamt für Wasser und Geologie, 2001. Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern, Seite 23.
- CloudCompare, 2020. CloudCompare - Downloads [WWW Document]. URL <http://www.cloudcompare.org/release/> (accessed 12.16.20).
- DIN 18123 (2011-04): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung, 2011.
- Dittrich, A., 1998. Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. *Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe*, Heft 198, 208p.
- DVWK, 1990. Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. *DVWK-Schriften*, Heft 92.
- ETH Zürich, 2020. BASEGRAIN [WWW Document]. URL <https://base-grain.ethz.ch/download/tools/basegrain.html> (accessed 11.12.20).
- ETH Zürich, 2014. Basegrain2p2.exe. Schweiz.
- Fehr, 1987. Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren [WWW Document]. URL <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/1980-1989/092.pdf> (accessed 12.16.20).
- Ferguson, R., 2007. Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. *Water Resour. Res.* 43, Seite 4. <https://doi.org/10.1029/2006WR005422>
- Garbrecht, 1961. Abflussberechnung für Flüssen und Kanäle. *Die Wasserwirtschaft*, 51. Jahrgang.
- Gomez, B., 1993. Roughness of stable, armored gravel beds. *Water Resour. Res.* 29, 3631–3642. <https://doi.org/10.1029/93WR01490>
- ifMU, 2020. Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebanalyse. ifMU GmbH. URL <https://www.ifmu.de/baugrund/laborversuche/siebanalyse-kornverteilung/> (accessed 11.12.20).
- Keulegan, G.H., 1938. Laws of turbulent flow in open channels Seite 717.

- Leica Geosystems, 2020. Leica RTC360 3D-Laserscanner | Leica Geosystems [WWW Document]. URL <https://leica-geosystems.com/de-at/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360> (accessed 11.25.20).
- Milan, D.J., 2009. Terrestrial Laser Scan-Derived Topographic and Roughness Data for Hydraulic Modelling of Gravel-Bed Rivers, in: Heritage, G.L., Large, A.R.G. (Eds.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp. 133–146. <https://doi.org/10.1002/9781444311952.ch9>
- Milhous, R.T., 2015. On grain roughness in rivers and streams 54–55.
- Nitsche, M., Rickenmann, D., Kircher, J.W., Turowski, J.M., Badaux, A., 2012. Macro-roughness and variations in reach-averaged flow resistance in steep mountain streams, *Water Resources Research*, 48, W12518, doi: 10.1029/2012WR012091.
- Pollyea, R.M., Fairley, J.P., 2011. Estimating surface roughness of terrestrial laser scan data using orthogonal distance regression. *Geology* 39, 623–626. <https://doi.org/10.1130/G32078.1>
- Rahman, Z., Slob, S., Hack, R., 2006. Deriving roughness characteristics of rock mass discontinuities from terrestrial laser scan data. *Eng. Geol. Tomorrow's Cities* 13.
- Rickenmann, 2014. *Methods for the Quantitative Assessment of Channel Processes in Torrents (Steep Streams)*. CRC Press.
- Rickenmann, D., 2014. Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen - Publikationen - WSL [WWW Document]. URL <https://www.wsl.ch/de/publikationen/methoden-zur-quantitativen-beurteilung-von-gerinneprozessen-in-wildbaechen.html> (accessed 12.8.20).
- Rickenmann, D., Recking, A., 2011. Evaluation of Flow Resistance in Gravel-Bed Rivers through a Large Field Data Set. *Water Resour. Res. - WATER RESOUR RES* 47. <https://doi.org/10.1029/2010WR009793>
- Sass, O., 2012. poster_climcatch.pdf [WWW Document]. URL https://static.uni-graz.at/fileadmin/urbi-institute/Geographie/downloads/misc/pdf/poster_climcatch.pdf (accessed 12.21.20).
- Schneider, J., Redtenbacher, M., Harb, G., Sass, O., Stangl, J., 2014. Starkregen und Überflutungsvorsorge - Flussmorphologische Prozesse in einem Wildbach-Einzugsgebiet - das Projekt ClimCatch (No. 5/14), *Korrespondenz Wasserwirtschaft*.
- Schöberl, F., 1981. Abpflasterungs- und Selbststabilisierungsvermögen erodierender Gerinne.
- Schröder, R., 1990. Bestimmung von Rauheiten, Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK).
- Strickler, 1923. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Sekretariat des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern, Nr. 16.
- Strickler, A., 1924. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. <https://doi.org/10.5169/SEALS-82804>
- Thompson, S.M., Campbell, P.L., 1979. Hydraulics of a Large Channel Paved with Boulders. *J. Hydraul. Res.* 17, 341–354. <https://doi.org/10.1080/00221687909499577>
- TU Bergakademie Freiberg, 2016. Hydrologie-III-D.pdf.

- Umach, L., 2014. Bedeutung der Approximation von Kornverteilungskurven bei der zweidimensionalen numerischen Simulation von Geschiebetransportprozessen, 1. Aufl. ed, Forum Umwelttechnik und Wasserbau. Innsbruck Univ. Press, Innsbruck.
- Wikipedia, 2020a. Robert Manning. Wikipedia.
- Wikipedia, 2020b. Land (Österreich). Wikipedia.
- Wong, M., Parker, G., 2006. Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database. J. Hydraul. Eng. 132, Seite 11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:11\(1159\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1159))

9. Anhang

9.1 Code

```

from matplotlib import path                                     //Import der
import time                                                  benötigten
import numpy as np                                           Pythonbibliothek
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
import matplotlib.pyplot as plt

# define polygon and check whether points are inside or outside
def cut_scatter_line(filename, P1, P2, P3, P4):
    inside = []
    polygon = path.Path([P1, P2, P3, P4])                    //Bereich definieren

    with open (filename) as f:                               //Filter: Welche Scan-
        for line in f:                                       punkte liegen inner-
            line = line.split()                               halb des Bereichs?
            try:
                point=(float(line[0], float(line[1]))
                if polygon.contains_point(point):
                    inside.append([float(line[0]),float(line[1]),float(line[
                    2])])
            except:
                continue

    insideout = np.asarray(inside)                            //Rückgabe der Werte
    return insideout                                         innerhalb des Bereichs

# define plane
def fit_plane(array):                                       //Ebene definieren
    tmp_A = []                                              //Ebene an Mittelwert
    tmp_b = []                                              der Scanwerte anpassen
    for i in range(len(array)):
        xs = array[:,0]
        ys = array[:,1]
        zs = array[:,2]
        tmp_A.append([xs[i], ys[i], 1])
        tmp_b.append(zs[i])
    b = np.matrix(tmp_b).T

```

```

A = np.matrix(tmp_A)
fit = (A.T * A).I * A.T * b

return fit                                     //angepasste Ebene ausgeben

#calculate distances
def compute_orthogonal_dist(fit,array):        //Berechnung
    distances = []                             für orthogonale
    for i in range(0,len(array)):              Abstände
        x1 = array[i][0]                       definieren
        y1 = array[i][1]
        z1 = array[i][2]
        d = abs(float(fit[0])*x1+float(fit[1])*y1+z1*-
+float(fit[2]))/(float(fit[0])*float(fit[0])+float(fit[1])
*float(fit[1])+1.))**(1./2.)                 //Abstand berechnen
        distances.append(d)
    return distances                           //Abstände ausgeben

    for i in range(0,len(array)):
        point = Point(array[i][0],array[i][1])
        if polygon.contains(point):
            inside.append([array[i][0],array[i][1],array[i][2]])

#load file
filename=r'C:\Users\...\XXX.txt'              //Datei einlesen

#define coodinates                             //Koordinaten des
p1 = (X,Y)                                     Bereichs definieren
p2 = (X,Y)
p3 = (X,Y)
p4 = (X,Y)

inside = cut_scatter_line(filename,p1,p2,p3,p4) //Polygon berechnen
print()
fit = fit_plane(inside)                        //Ebene berechnen
distances = compute_orthogonal_dist(fit,inside) //Abstände berechnen
#-----
#arithmetic mean
Ra = sum(distances) / len(distances)          //arithm. Mittelwert
ks_Ra = 4.5 *Ra #(Thompson & Campell)        //hydr. Rauheit

```

```

#Stricklerbeiwerte - Ra      //Berechnung der Stricklerwerte über
                             verschiedene Ansätze mit der Verwendung
                             des arithm. Mittels

#Meyer-Peter&Müller
kst_Ra1 = 26./(ks_Ra**(1./6.))
#Strickler
kst_Ra2 = 6.7*((9.81)**(1./2))*(1./(ks_Ra**(1./6)))
#Wong und Parker
kst_Ra3 = (23.2)/((0.5*ks_Ra)**(1./6))
#Schöberl
kst_Ra4 = (23.5)/(ks_Ra**(1./6))
#DVWK
kst_Ra5 = 21./(ks_Ra**(1./6.))
#Manning
n6 = 0.0131*(Ra*1000)**(1./6)
kst_Ra6 = 1./n6
#Absolut deviation relation (LAD)
n7 = 0.0087*(Ra*1000)**(0.5)
kst_Ra7 = 1./n7
#20% quantile
n8 = 0.0077*(Ra*1000)**(0.43)
kst_Ra8 = 1/n8

#-----
#root square mean
distances_np = np.asarray(distances)
Rrms = np.sqrt(np.mean(distances_np**2.))           //quadr. Mittel
ks_Rrms = 4.5* Rrms                                //hydr. Rauheit

#Stricklerbeiwerte - Rrms  //Berechnung der Stricklerwerte über
                             verschiedene Ansätze mit der Verwendung
                             des quadr. Mittels

#Meyer-Peter&Müller
kst_Rrms1 = 26./(ks_Rrms**(1./6.))
#Strickler
kst_Rrms2 = 6.7*((9.81)**(1./2))*(1./(ks_Rrms**(1./6)))
#Wong und Parker
kst_Rrms3 = (23.2)/((0.5*ks_Rrms)**(1./6))
#Schöberl
kst_Rrms4 = (23.5)/(ks_Rrms**(1./6))
#DVWK

```

```

kst_Rrms5 = 21./(ks_Rrms**(1./6.))
#Manning
n_6 = 0.0131*(Rrms*1000)**(1./6)
kst_Rrms7 = 1./n_6
#Absolut deviation relation (LAD)
n_7 = 0.0087*(Rrms*1000)**(0.5)
kst_Rrms7 = 1./n_7
#20% quantile
n_8 = 0.0077*(Rrms*1000)**(0.43)
kst_Rrms8 = 1/n_8

# for spheres //Berechnung der Kugeldurchmesser
E = Ra*11.03 //für die Labormessung)
print(E)

#print plane //Punkte und Ebene plotten(als Kontrolle)
ax = plt.subplot(111, projection='3d')
ax.scatter(inside[0::1,0],inside[0::1,1],inside[0::1,2],s=1.5,
marker='o') //Bereich plotten

xlim = ax.get_xlim()
ylim = ax.get_ylim()
X,Y = np.meshgrid(np.linspace(xlim[0], xlim[1]),np.linspace(ylim[0],
ylim[1])) //Achsen definieren
Z = np.zeros(X.shape)
for r in range(X.shape[0]): //Ebene hinzufügen
    for c in range(X.shape[1]):
        Z[r,c] = fit[0] * X[r,c] + fit[1] * Y[r,c] + fit[2]
ax.plot_wireframe(X,Y,Z, color='k')
ax.set_xlabel('X-Koordinaten[m]')
ax.set_ylabel('Y-Koordinaten[m]')
ax.set_zlabel('Z-Koordinaten[m]')
plt.title('Ebene innerhalb der ausgewählten Punktwolke')

```

9.2 Fotodokumentation der zweiten Naturmessung

1



2



3



4



5



6



7



8



9



10



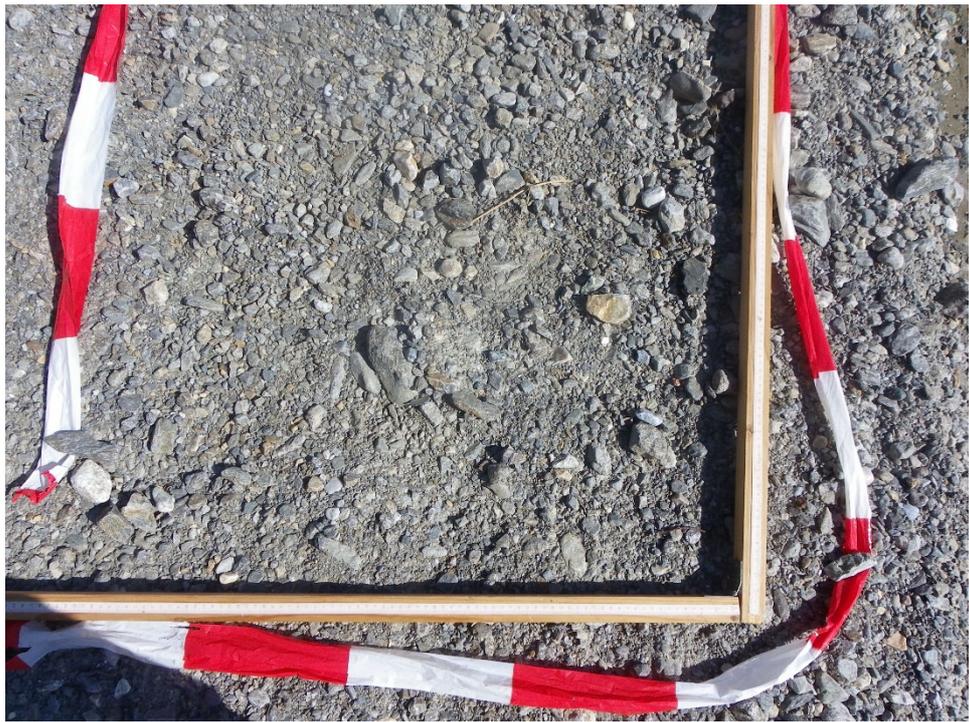
11



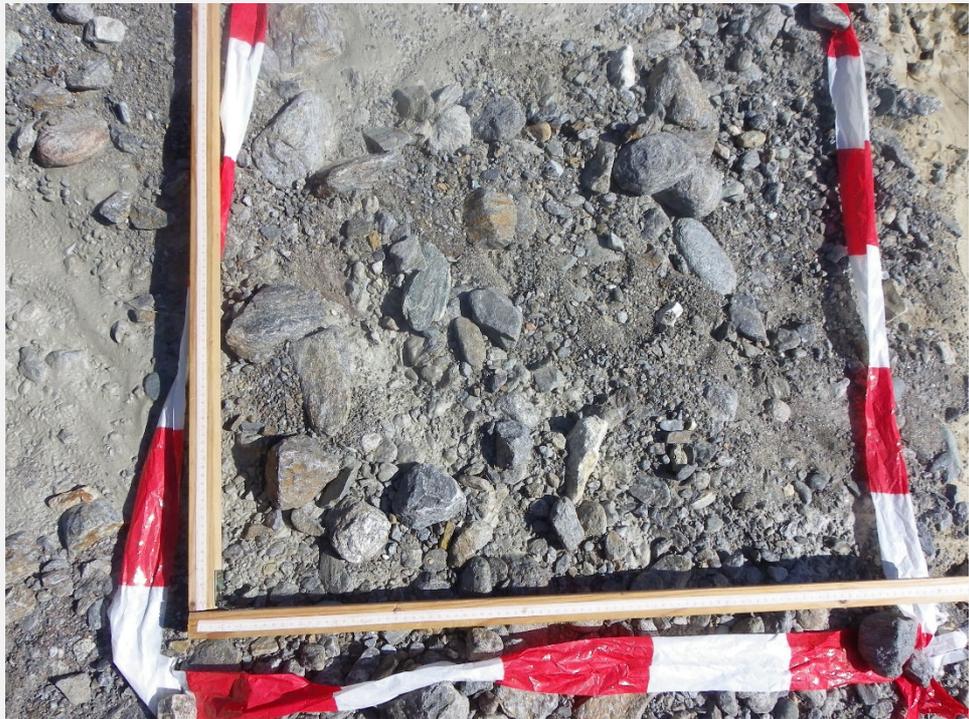
12



13



14



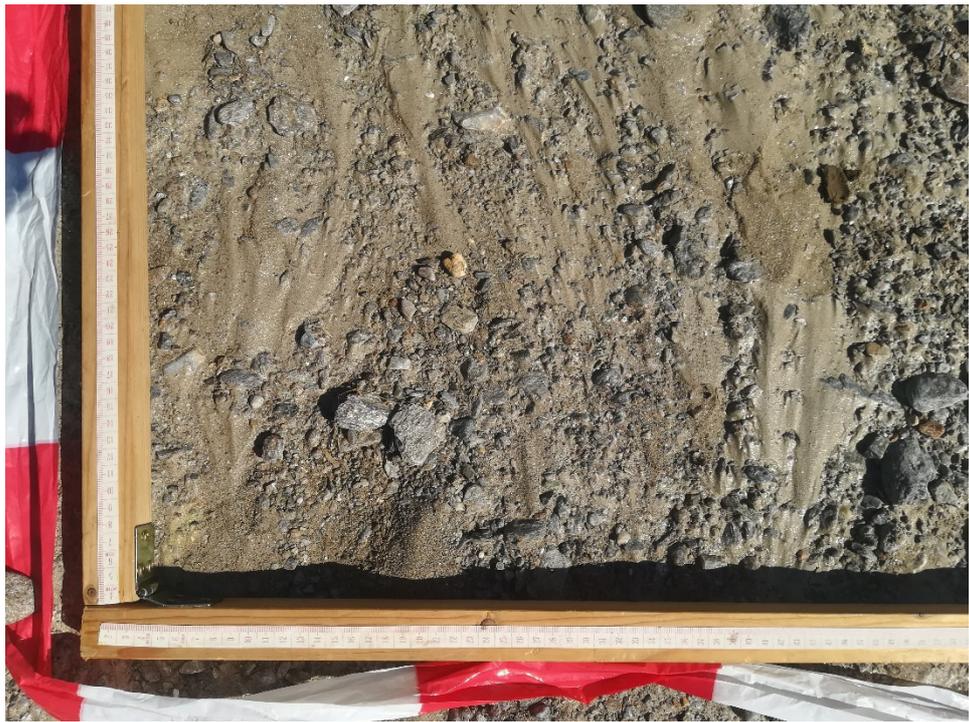
15



16



17



18



19



20



21



22

